



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ALEKSI EILO

ASENNUSVIRHEIDEN VAIKUTUS
KESKIJÄNNITEKAAPELIPÄÄTTEIDEN TOIMINTAKUNTOON
Diplomityö

Tarkastaja: dos. Kari Lahti

Tarkastaja ja aihe hyväksytty
1. lokakuuta 2018

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Aleksi Eilo: Asennusvirheiden vaikutus keskijännitekaapelipäätteiden toimintakuntoon

Diplomityö, 76 sivua

Marraskuu 2018

Pääaine: Sähköverkot ja -markkinat

Tarkastaja: dos. Kari Lahti

Avainsanat: PD, osittaispurkausmittaus, keskijännite, kaapelipääte, asennusvirhe

Sähköverkkoa maakaapeloidaan, koska siitä halutaan tehdä luotettavampi ja vähemmän vika-altis. Maakaapeli ei ole ilmajohdon tavoin altis myrskyjen aiheuttamille tuhoille tai salamaniskuille, mutta myös kaapeleissa voi esiintyä vikoja. Koska maakaapelin päätteet ja jatkot tehdään pääasiassa kentällä käsin, niiden eristysrakenteeseen on mahdollista jäädä epäideaalisuuksia. Eristysrakenteeseen jääneellä vialla voi olla osittaispurkausten syntymiselle otollinen vaikutus joka voi käynnistää eristysrakenteen vikaantumiskehityksen. Kaapeleissa, kaapelipäätteissä ja -jatkoksissa esiintyvät osittaispurkaukset ovat pääasiallinen sisäinen syy kaapelin vikaantumiselle ja siksi niiden esiintymiselle otollisten olosuhteiden syntyminen tulisi estää mahdollisimman tehokkaasti.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia keskijänniteverkon maakaapelin kaapelipäätteissä asennusvirheiden seurauksena syntyviä osittaispurkauksia ja niiden vakavuutta. Työssä tehdään eri tyyppisiin kaapelipäätteisiin asennusvirheitä ja tutkitaan niiden vaikutuksia päätteiden osittaispurkausilmiöihin. Varsinaisten päätteen teon yhteydessä tapahtuvien asennusvirheiden lisäksi tutkitaan myös joidenkin muiden rasiusten, kuten mekaanisen väännön, lämpötilan ja kosteiden olosuhteiden vaikutuksia kaapelirakenteen ikääntymistä kiihdyttävien ilmiöiden syntymiseen. Lopuksi osa päätteistä läpikäy kuuden viikon mittaisen vanhennuskokeen korotetulla jännitetasolla.

Työssä käy ilmi, että sähkökenttää ohjaavien materiaalien virheellisen asentamisen vuoksi syntyvät osittaispurkaukset voivat syttyä jo vaihejännitettä pienemmällä jännitetasolla ja purkaustasot voivat viasta riippuen olla hyvinkin suuria. Lisäksi myös esimerkiksi kaapelin päeristeen pinnalle asennuksessa mahdollisesti joutuva puolijohtava pöly voi aiheuttaa päätteen eristysrakenteessa osittaispurkauksia. Työssä tutkittujen kaapelipäätteiden mekaaninen kesto sekä kosteustiiviys todettiin mittauksissa hyväksi.

Jos pääte halutaan tehdä mahdollisimman hyvin ja laadukkaasti, se edellyttää suurta huolellisuutta ja päätteen asennusohjeiden pikkutarkkaa noudattamista. Koska mikä tahansa osittaispurkaus voi olla kaapelipäätteelle vaarallinen, asentajat on syytä perehdyttää kunnolla jokaisen kaapelikomponentin asentamista varten. Näin vältetään suurelta osalta kaapeliverkon pitkistä ja kalliista käyttökeskeytyksistä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Electrical Engineering

Aleksi Eilo: Effects of installation errors on the operational condition of medium voltage cable terminations

Master of Science Thesis, 76 pages

November 2018

Major: Power systems and market

Examiner: Adjunct professor Kari Lahti

Keywords: PD, partial discharge measurement, medium voltage cable, cable termination, installation error

Electric grids are being made more reliable and less prone to faults by replacing aerial lines with underground cables. Underground cables practically cannot be hit by lightning but they may still be subjected to internal faults. It's possible that there may exist some unidealities in the insulation structures of cable terminations and joints since the installation is done by hand in the field. If such defects are not detected and the cable is put on service it's possible that partial discharges occur and start developing a fault in the cable. Partial discharges are the main reason for electrical degradation of the insulation materials in cable terminations and thus their occurrence shall be avoided.

This master's thesis discusses the severity of certain installation errors and resulting partial discharges in medium voltage cable terminations. A variety of possible installation defects are made on terminations installed on short cable sections and the resulting partial discharge activity is studied in the laboratory. Some cable terminations are also subjected to mechanical and thermal stresses and subjected to moisture ingress test in order to study the effects of such stresses on internal partial discharge activity. After other tests, some of the terminations are put on a six week constant voltage test in order to study their partial discharge trends along a bit longer time period.

Based on the gathered results, errors made in the installation of the stress control section of a termination may lead to high intensity partial discharge phenomena which may incept at a voltage lower than the normal service voltage. In addition to stress control faults it's possible that partial discharges also occur when semiconducting dust from the semiconducting layer of the cable insulation is transferred onto the main insulation when the sanding of the insulation is done incorrectly. The resistance against mechanical and thermal stresses and sealing against water were found to be on a good level.

Any internal partial discharge may be dangerous to a cable termination. Thus the electricians installing the cable terminations must be familiar with the different cable components and they shall carefully follow the given assembly procedures. When the installation of cable terminations is done with care many unnecessary outages and costs can be avoided.

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Sähköenergiatekniikan laboratoriolle. Opinnäytetyön ohjaajana ja tarkastajana toimi Kari Lahti. Haluan kiittää Karia suurjännitelaboratorion käyttöopastuksesta, työn ohjaamisesta sekä asiantuntevasta avusta osittaispurkauksiin ja standardeihin liittyvän taustatiedon kanssa. Lisäksi haluan kiittää Kenneth Väkeväistä ja Janne Lappalaista Ensto Oy:n järjestämästä kaapelipäätteen asennuskoulutuksesta ja työssä käytetyistä kaapelipäätetarvikkeista.

Tampereella, 19.11.2018

Aleksi Eilo

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	SÄHKÖKENTÄN MUODOSTUMINEN ERISTYSRAKENTEESSA	3
2.1	Sähkökentän muodostuminen	3
2.2	Johdin ja eriste sähkökentässä	6
2.3	Sähkökentän taipuminen rinnakkaisissa eristeissä	7
2.4	Polymeerieristeen vanheneminen ja häviöt	8
2.5	Läpilyönti kiinteässä eristeessä	11
3.	OSITTAISPURKAUKSET JA NIIDEN MALLINTAMINEN	14
3.1	Pintapurkaus	15
3.2	Ontelopurkaus	16
3.3	Koronapurkaus	20
3.4	Osittaispurkausten mittaus	22
4.	KAAPELIT JA KAAPELIPÄÄTTEET	28
4.1	Kaapelin rakenne	28
4.2	Kaapelipääte	29
4.3	Kaapelipäätteen asennus ja asennusvirheet	32
4.3.1	Lämpökutistepääte	33
4.3.2	Kylmäkutistepääte	35
5.	KOKEELLISET LABORATORIOMITTAUKSET	37
5.1	Mittaus- ja koestuslaitteisto	37
5.2	Testiohjelma ja tutkitut kaapelipäätteiden vikatyypit	39
5.2.1	Vikavapaiden kylmäkutisteiden asennus ja mittaus	41
5.2.2	Kentänohjausmassan asennuksen ongelmat	42
5.2.3	Hohtosuojan sorvauksen ja pääeristeen hionnan ongelmat	43
5.2.4	Asennus- ja käyttöolosuhteiden ongelmat	48
5.3	Mittausten toteutus	49
5.4	Tulokset	51
5.4.1	Osittaispurkausten syttymis- ja sammumisjännitteet	51
5.4.2	Purkaustasot ja -trendit	54
5.4.3	PRPD -pulssikuvioiden analyysi	59
5.4.4	Taivutuskoe ja tiiveyskoe	62
5.4.5	Vanhennuskoe	65
5.4.6	Mittausten luotettavuus ja toistettavuus	69
6.	YHTEENVETO	71
	LÄHTEET	74

LYHENTEET JA MERKINNÄT

TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
PRPDA	Phase Resolved Partial Discharge Analysis
PD	Partial Discharge
VLF	Very Low Frequency
DAC	Damped AC
RIV	Radio Influence Voltage
dQ	Varausalkio
$d\bar{F}$	Voima-alkio
V	Jännite
V_0	Jännitteen maataso
Ψ	Sähkövuo
Q	Kokonaisvaraus
\bar{D}	Sähkövuon tiheys
\bar{E}	Sähkökentän voimakkuus
ε	Permittiviteetti
V_r	Palaava jännite
V_p	Polarisaation aiheuttava ulkoinen jännite
I_{p+}	Positiivinen varausvirta
I_{p-}	Negatiivinen varausvirta
t	Aika
P_d	Eristeen tehohäviö
$\tan \delta$	Häviökerroin

C	Kapasitanssi
q	Näennäisvaraus
V_i	Osittaispurkausten syttymisjännite
V_e	Osittaispurkausten sammumisjännite
N	Osittaispurkausten toistumistaajuus
K_u	Kurtosis, huipukkuus
Q_a	Asymmetry, epäsymmetria
cc	Cross-correlation coefficient, ristikorrelaatiokerroin
Z	Impedanssi
C_a	Koestettavan näytteen kapasitanssi
C_k	Kyt Kentäkondensaattorin kapasitanssi
f	Taajuus

1. JOHDANTO

Maakaapeleiden käyttö on yleistymässä kaupungistumisen vuoksi ja jo olemassa olevia ilmajohtoja muutetaan maakaapeleiksi yhä enemmän sähköverkon vikojen ja vika-aikojen vähentämiseksi. Vaikka maakaapeli on ilmajohtoon verrattuna vähemmän altis salamaniskuille ja myrskyn aiheuttamille oiko- ja maasuluille, kaapeliin voi silti syntyä vikoja jotka ovat pääsääntöisesti kalliita ja vaikeita korjata johtuen kaapelin sijainnista maan alla.

Tässä työssä tutkitaan erilaisten asennusvirheiden vaikutuksia kaapelipäätteissä syntyviin sisäisiin osittaispurkauksiin ja niiden suuruuteen. Kaapelipäätteiden vioista suuri osa johtuu asentajien tekemistä virheistä päätteen asennuksen aikana. Vaikka kaapeli koestetaan tehtaalla sen valmistuksen yhteydessä, kaapelipäätteiden käyttöönnotossa osittaispurkausmittauksia ei tehdä. Tästä syystä on tärkeää tietää miten, kuinka helposti ja kuinka vakavia vikoja asennuksen aikana kaapelipäätteelle on mahdollista aiheuttaa.

Tässä työssä tutkittaviin kaapelipäätteiden asennusvirheisiin kuuluu muun muassa kaapelin hohtosuojan sorvauksessa, pääeristeen hionnassa sekä kentänohjausmassan asentamisessa syntyviä vikoja. Asentajan tulisi lähtökohtaisesti noudattaa kaapelipäätteen asennusohjetta pikkutarkasti, mutta pieniä ja mahdollisesti kriittisiä virheitä voi asennuksessa sattua kokeneemmallekin asentajalle. Päätteisiin tehtyjen asennusvirheiden lisäksi tutkitaan niiden vesitiiveyttä ja kuinka herkästi asennuksen yhteydessä mahdollisesti aiheutuvat mekaaniset rasitukset aiheuttavat päätteissä osittaispurkauksia. Mittausten lopuksi tehdään eniten purkausaktiivisuutta osoittaneille kaapelipäätteille kuuden viikon pituinen rasituskoe, jossa tutkitaan päätteissä olevien osittaispurkausilmiöiden käyttäytymistä ja tasaantumista hieman pidemmässä vakiojänniterasituksessa.

Työn teoriaosuudessa käydään läpi sähkökentän vaikutuksia eristysrakenteisiin, osittaispurkaustyyppejä ja niiden mallintamista sekä kaapelin ja tutkittavana olevien kaapelipäätteiden rakenne ja asentaminen. Teoreettista tietoa tarvitaan suurilla jännitteillä tapahtuvien ilmiöiden ja kaapelipäätteen rakenteen ymmärtämiseen sekä tulosten analysointiin. Lisäksi lukijan on hyvä tietää miten pääte asennetaan, jotta lukija saa kuvan siitä, kuinka helposti asennusvirheitä voi sattua. Lopuksi esitellään kaapelipäätteisiin asennetut viat sekä kokeelliset laboratoriomittaukset ja analysoidaan tulokset.

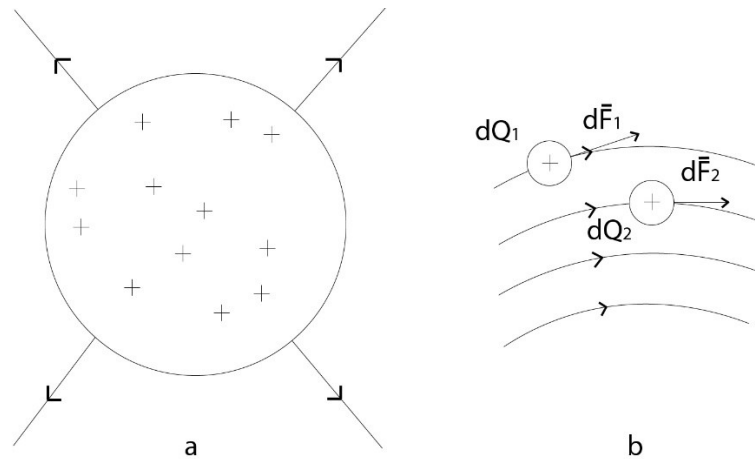
Työn lopussa, tulosten analysoinnin jälkeen, on koottu tutkimusperäistä tietoa osittaispurkausilmiöiden syntymisestä ja kehittymisestä erilaisten asennusvirheiden ja käyttöolosuhteiden vaikutusten seurauksena. Lisäksi mittaustulosten perusteella on saatu tietoa myös osittaispurkausilmiöiden haitallisuudesta kaapelieristeelle.

2. SÄHKÖKENTÄN MUODOSTUMINEN ERISTYSRAKENTEES- SA

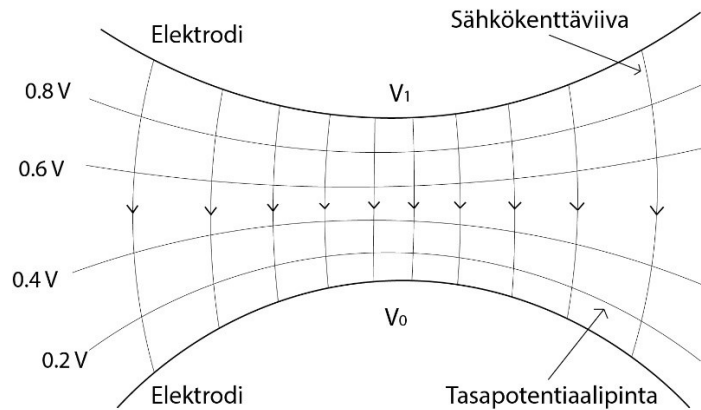
Tässä luvussa käsitellään sähkökenttäteoriaa ja sähkökentän vaikutusta eristysrakenteeseen. Keskijännitekaapelin eristeen tehtävänä on eristää kaapelin jännitteiset osat maatasosta. Eriste myös johtaa johtimessa ja eristysrakenteessa syntyvää lämpöä pois kaapelin sisältä. Eristeet voidaan jakaa keskijännitetasolla kahteen pääryhmään: muoviset ja öljypaperiset eristeet. Nykyaikaiset muovieristeet ovat suurimmaksi osaksi syrjäyttäneet öljypaperiset, mutta öljypaperisia eristeitä on vielä käytössä jonkin verran. Eristeen käyttäytymisen tunteminen sähkökentässä on tärkeää, koska varsinkin suurilla jännitteillä sähkökentän taipuminen eristysten rajapinnoilla aiheuttaa ylimääräistä jänniterasitusta ja esimerkiksi ilman läpilyöntilujuus voi ylittyä.

2.1 Sähkökentän muodostuminen

Sähkökenttä muodostuu sähköisen varauksen ympärille tai kahden eri potentiaalissa olevan elektrodin välille. Sähkökenttää kuvataan staattisesta, positiivisesta varauksesta lähtevillä sähkökenttäviivoilla. Jos varaus on pallon muotoinen, kenttäviivat lähtevät kuvan 2.1a mukaisesti pallosta symmetrisesti poispäin. Jos sähkökenttä taas esiintyy kahden elektrodin välissä, sen jakauma voidaan esittää graafisesti kenttäviivojen ja tasapotentiaalipintojen avulla kuten kuvassa 2.2. Kahden elektrodin välissä olevassa sähkökentässä kenttäviivat kulkevat positiivisesta varauksesta kohti negatiivista varausta. [1, s. 3] Tasapotentiaalipinnat kertovat missä pisteissä sähkökentässä on sama potentiaali. Sähkökenttäviivat ja nuolella merkitty sähkökentän suunta kertovat minkä suuntaisen voiman sähkökenttä aiheuttaisi positiivisesti varattuun massattomaan hiukkaseen ja mihin suuntaan se kulkisi. Positiivisesti varattu hiukkanen sähkökentässä ja voimavektorit ovat esitettynä kuvassa 2.1b.



Kuva 2.1 a) Varaukertymän aiheuttama sähkökenttä. **b)** Sähkökentän aiheuttama, varaukseen kohdistuva voima.



Kuva 2.2 Sähkökentän jakauma elektrodivälissä.

Varattu kappale muodostaa sähkökentän ympärilleen [1, s. 3]. Sähkökenttää voidaan tarkastella sähkövuon avulla siten, että sen voidaan ajatella koostuvan vuoalkioista, joista jokainen lähtee yksittäisestä positiivisesta sähkövarausalkiosta yhtälön 2.1 mukaisesti ja kulkee sähkökenttäviivojen suuntaisesti. Sähkövuo Ψ kuvaa tietystä kokonaisvarauksen Q sisältävästä tilavuudesta lähtevää kokonaissähkövuota [1, s. 4].

$$d\Psi = dQ \quad (2.1)$$

Sähkövuon tiheys \bar{D} on verrannollinen sähkökentän voimakkuuteen \bar{E} yhtälön 2.2 mukaisesti. Permittiviteetti ε riippuu väliaineesta ja määrää tietyn sähkökentän voimakkuuden aiheuttaman sähkövuon tiheyden kussakin väliaineessa. Permittiviteetti kuvaa siis väliaineen kykyä heikentää ulkoista sähkökenttää [1, s. 6]. Eristeen suhteellinen permittiviteetti ε_r merkitään suhteessa tyhjän permittiviteettiin ε_0 yhtälön 2.3 mukaisesti. Tyhjän permittiviteetin arvo on $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$ [2, s. 20].

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E} \quad (2.2)$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.3)$$

Maakaapelin eristysrakenne koostuu useasta erilaisen permittiviteetin omaavasta materiaalista. Eristeiden permittiviteeteillä ja sähkökentän ohjauksella on suuri vaikutus kaapelin jännitelujuuteen. Kun kaksi eri permittiviteetin omaavaa eristettä on samassa ulkoisessa sähkökentässä, suuremman permittiviteetin omaavassa aineessa on pienempi sähkökentän voimakkuus kuin pienemmän permittiviteetin omaavassa aineessa. Tästä johtuen pienemmän permittiviteetin omaavaan aineeseen kohdistuu suurempi jänniterasitus. Taulukossa 2.1 on esitettynä joitakin materiaaleja ja niiden suhteellisia permittiviteettejä.

Taulukko 2.1 Eräiden materiaalien suhteellisia permittiviteettejä verkkotaajuudella. [3]

Materiaali	Suhteellinen permittiviteetti
Ilma	1,000536
Typpi	1,000580
Hiilidioksidi	1,60
Kaapeliöljy	2,20
Vesi	4,0-88,0
Silikoniöljy	2,2-2,9
Silikonikumi	3,2-9,8
Polyeteeni (PEX)	2,2-2,4
Epoksihartsi	3,6
Grafiitti	12,0-15,0
Lasi	3,7-10,0

Edellä olevien yhtälöiden käyttö edellyttää, että tutkittava eristysrakenne on homogeeninen ja isotrooppinen. Homogeenisuus tarkoittaa eristeen tasalaatuisuutta siten, että sen sähköiset ominaisuudet ovat samat jokaisessa eristeen pisteessä. Isotrooppisuus tarkoittaa sähkövuon ja sähkökentän samansuuntaisuutta. Myöskään eristeen susceptibiliteetti, eli polarisoituvuus sähkökentässä, ei saa riippua sähkökentän voimakkuudesta näitä yhtälöitä käytettäessä. [2, s. 18] Huomioitavaa on, että tasajännitteellä sähkökenttä jakautuu eristemateriaalien resistiviteettien ja vaihtojännitteellä permittiviteettien mukaan. Eristeen tärkein tehtävä on estää sähköä

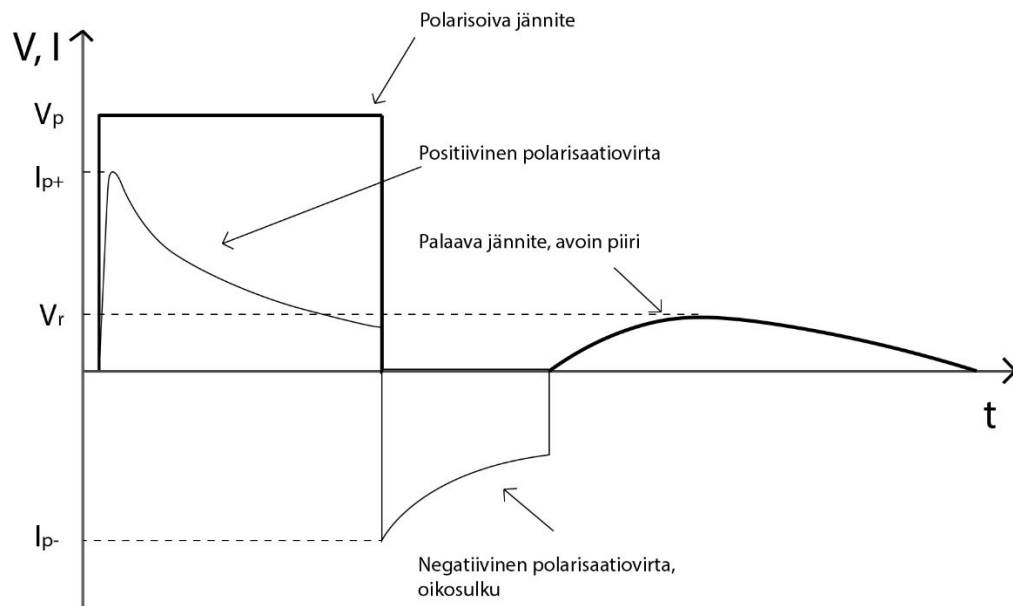
kulkemasta ja siksi hyvässä eristemateriaalissa sähkönjohtavuutta ei saa esiintyä merkittävässä määrin.

2.2 Johdin ja eriste sähkökentässä

Sähkökentän vaikutus johtimeen ja eristeeseen aiheuttaa toisistaan poikkeavat ilmiöt. Sähkökenttä on määritelty kulkemaan vektoreina positiivisesta varauksesta negatiiviseen. Johtimessa olevat positiiviset varauksenkuljettajat siis pyrkivät kohti sähkökentän negatiivista elektrodia ja negatiiviset varauksenkuljettajat, elektronit, kohti positiivista elektrodia. Johtimessa olevat varauksenkuljettajat hakeutuvat tällä tavoin tasapainoon ulkoisen sähkökentän kanssa muodostaen oman, ulkoiseen kenttään nähden vastakkaissuuntaisen sähkökentän. Lopulta johtimen sisällä vaikuttavien sähkökenttien nettovaraukseksi muodostuu nollavaraus. [4, s. 5]

Kun eristävä materiaali altistetaan sähkökentälle, varauksenkuljettajat eivät pääse liikkumaan, koska suurin osa elektroneista on sitoutuneena itse eristemateriaalin neutraaleihin molekyyliin. [4, s. 6] Eriste kuitenkin polarisoituu ollessaan sähkökentässä. Atomien ja molekyylien positiivisesti ja negatiivisesti varautuneisiin osiin ja dipoleihin kohdistuu sähkökentässä erisuuntaiset voimat, joiden ansiosta rakenteissa tapahtuu vähäistä rakenneosasten kääntymistä ja pyrkimistä pois paikaltaan [1, s. 5]. Polarisaatio pyrkii siten pienentämään eristeeseen vaikuttavaa sähkökenttää.

Vaihtojännitteellä polarisaatio aiheuttaa dielektrisiä häviöitä lämmittämällä eristettä rakenneosasten kääntyillessä sähkökentän vaikutuksesta [2, s. 50]. Tasajännitteellä eriste polarisoituu sähkökentän muodostuessa, mikä näkyy hetkellisenä varausvirtana I_{p+} ja edelleen eristeiden sähköisenä varautumisena. Ulkoisen sähkökentän poistuttua polarisaatio purkautuu ja virta I_{p-} kulkee toiseen suuntaan. Jos piiri jää avoimeksi, syntyy palaava jännite V_r kuten kuvassa 2.3 on esitetty. [5, s. 9] Kuvassa lisäksi V_p on polarisaation aiheuttava ulkoinen jännite.

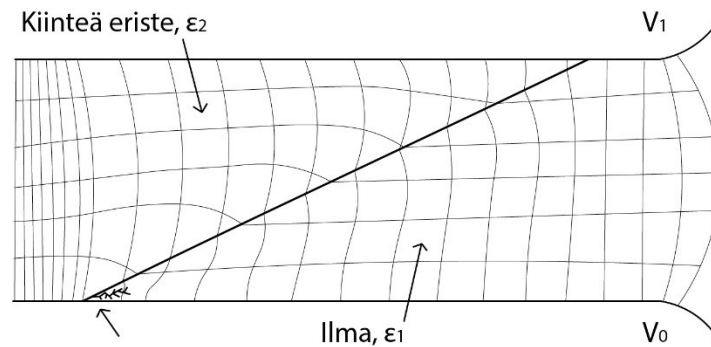


Kuva 2.3 Kuva eristeen alkuvaiheen polarisaatiovirroista ja polarisaation aiheuttamasta palaavasta jännitteestä.

Vaikka eristysrakenteita mallinnetaan usein ideaalisina sähköä johtamattomina rakenteina, käytännön eristeessä esiintyy kuitenkin aina jonkin verran vuotovirtaa sen ollessa sähköisen rasituksen alaisena [5, s. 22]. Suurilla sähkökentän voimakkuuksilla, ennen varsinaisen läpi- tai ylilyönnin syntymistä eristeessä tai eristeiden rajapinnoilla voi syntyä osittaispurkauksia jotka kuluttavat eristettä ja ennakoivat mahdollista eristysrakenteen eristävän ominaisuuden pettämistä. Eristysrakenteen kestävyys vaikuttavat sen yli vaikuttavan sähkökentän ja osittaispurkausten ilmenemisen lisäksi myös eristeen vanheneminen ja siitä johtuvat rakenteelliset ja kemialliset muutokset, jotka heikentävät eristeen läpilyöntilujuutta ajan kuluessa.

2.3 Sähkökentän taipuminen rinnakkaisissa eristeissä

Jos eristysrakenne koostuu rinnakkaisista eristeistä, kuten esimerkiksi kaapelipääätteessä, on otettava huomioon jänniterasituksen kasvaminen siirryttäessä suuremman permittiviteetin omaavasta eristeestä pienemmän permittiviteetin omaavaan eristeeseen. Jos sähkövuoto kohtaa kahden eristeen rajapinnan muussa kulmassa, kuin kohtisuoraan, sähkövuon suunta muuttuu rajapinnassa [6, s. 2]. Sähkökentän taipuminen voi muodostua ongelmaksi, jos jänniterasitus kasvaa eristeiden rajapinnalla liian suureksi pienemmän permittiviteetin omaavan eristeen jännitelujuuden näkökulmasta. Kuvassa 2.4 on esitettyä kiinteän eristeen rajapinta ilman kanssa kahden elektrodin välissä. Kuvassa ilman permittiviteetti ϵ_1 on pienempi, kuin kiinteän eristeen permittiviteetti ϵ_2 . Suurin jänniterasitus syntyy ilman ja kiinteän eristeen rajapinnalle nuolen osoittamaan kohtaan lähelle kuvan alemmaa elektrodia ja ylilyönnin mahdollisuus on suurimmillaan.



Kuva 2.4 Kahden eri permittiviteetin omaavan eristeen rajapinta kahden elektrodin välissä. Kuva muokattu lähteestä [2, s. 29].

Kaapelieristeiden tapauksessa vaihtojännitekäytössä sähkökenttää pyritään ohjaamaan joko suuren permittiviteetin omaavilla eristemateriaaleilla tai puolijohtavilla materiaaleilla [6, s. 3]. Kentänohjausta tarvitaan esimerkiksi kaapelijatkoksissa sekä kaapelipääteissä ja se toteutetaan yleensä käyttämällä erillistä kentänohjausmassaa tai – elektrodeja. Sähkökentän taipumista kahden eri permittiviteetin omaavan materiaalin rajapinnalla, joka ei ole sähkökenttää vastaan kohtisuorassa, täytyy pehmentää, jotta eristeessä vältetään osittaispurkauksilta, läpilyönniltä tai ylilyönniltä.

2.4 Polymeerieristeen vanheneminen ja häviöt

Kuten kaikki eristeet, myös polymeerieristeet vanhenevat ajan kuluessa erilaisten rasitusten vuoksi. Eristeiden vanhenemiseen vaikuttavat muun muassa asennus- ja käyttöolosuhteet, ilmankosteus, lämpötila, osittaispurkausten esiintyminen sekä sähköinen ja mekaaninen rasitus.

Eristeen tärkeimmät ominaisuudet ovat mekaaninen lujuus ja läpilyöntikestoisuus sen muiden dielektristen ominaisuuksien lisäksi. Mekaaniset rasitukset voivat muuttaa eristyksen muotoa ja synnyttää pieniä onteloita tai halkeamia eristeeseen. Mekaanista rasitusta voi aiheuttaa esimerkiksi asennuksessa tai aurauksessa tapahtuva kaapelin taipuminen, roudan aiheuttama maakerrosten liikkuminen tai sähköisten voimien aiheuttama paine ja värinä. Sähköiset varaukset aiheuttavat mekaanisia voimia elektrodien välille ja esimerkiksi vaihtojännitekäytössä mekaaninen rasitus voi olla jatkuvaa ja jaksottaista. Eriste saattaa osittain puristua kasaan ja sähköisistä voimista johtuva mekaaninen rasitus voi edelleen kasvaa elektrodien välimatkan pienenemisen vuoksi. Tällainen eristeen vanheneminen, ja näin aiheutuva läpilyönti, on kuitenkin harvinainen tapahtuma [4, s. 9]. Jos eristeeseen mekaanisten tai muiden rasitusten ansiosta syntyy onteloita tai halkeamia, osittaispurkausten syntymistodennäköisyys kasvaa ja eriste alkaa menettää eristäviä ominaisuuksiaan.

Polymeerieristeet vanhenevat myös lämpötilan vaikutuksesta. Lämpötilan muutokset voivat aiheuttaa mekaanista rasitusta eristeen laajetessa ja kutistuessa lämpötilan vaihtelun mukana [7, s. 705]. Lisäksi polymeerieristeen johtavuus tyypillisesti kasvaa lämpötilan noustessa ja eriste pehmenee. Korkeat lämpötilat vanhentavat eristettä myös kemiallisesti esimerkiksi hapettumisreaktion kautta lisäten vapaiden varauksenkuljettajien liikkuvuutta [8, s. 1546].

Myös osittaispurkaukset vaurioittavat eristettä kuluttamalla ja lämmittämällä sitä paikallisesti sekä aiheuttamalla kemiallisia reaktioita vapaiden radikaalien ja typpioksidin muodostumisen kautta. Typpioksidi muodostaa typpihappoa reagoidessaan veden kanssa, joka voi vaurioittaa orgaanisia aineita sisältäviä eristeitä ja vapaat radikaalit voivat aiheuttaa eristeessä kemiallisia muutoksia [5, s. 27].

Eristeisiin kohdistuu edellä mainittujen rasitusten lisäksi useita muitakin rasituksia. Ultraviolettisäteily, gammasäteily ja röntgensäteily voivat haurastuttaa polymeerejä rikkomalla eristeen molekyyliketjuja. Hapettuminen, eristemateriaalin rakenteen muuttuminen ajan kuluessa, pintapurkaukset, ontelopurkaukset, urautuminen, eroosio, sähkö- ja vesipuut sekä halkeilu heikentävät eristysmateriaalien ominaisuuksia [7, s. 705].

Sähköisessä rasituksessa olevassa eristysrakenteessa saattaa osittaispurkausten seurauksena syntyä myös sähköpuita jotka pyrkivät laajenemaan eristysrakenteen läpi elektrodilta toiselle. Ontelossa syntyvän osittaispurkauksen lisäksi myös sähköpuissa syntyvät purkaukset kuluttavat eristettä sähköisesti ja kemiallisesti. Purkauksessa liikkuvat elektronit pommittavat eristettä rikkoen sitä [9, s. 843] ja eristeen hajoamisesta syntyvät kemialliset tuotteet voivat kuluttaa eristettä entisestään.

Vaihtojännitteellä eristeessä syntyvät dielektriset häviöt lämmittävät eristettä johtimen tuottaman lämmön lisäksi. Yleensä myös eristeen johtavuus kasvaa lämpötilan noustessa ja siten myös tehohäviöt kasvavat. Kunnossa olevan eristyksen dielektriset häviöt ovat vakiotajuudella ja –lämpötilassa likimain verrannolliset sähkökentän voimakkuuden neliöön kaavan 2.4 mukaisesti [5, s. 22] ja eristeen johtavuus on hyvin pieni. Tasajännitekäytössä eristeiden tehohäviöt ovat myös verrannollisia niiden lämpötilaan, mutta aiheutuvat vain eristeen johtavuudesta [5, s. 23].

$$P_d \propto E^2 \quad (2.4)$$

Eristeiden kuntoa voidaan arvioida niin kutsutun häviökertoimen $\tan \delta$ avulla. Häviökerroin määritellään eristeen kompleksisen permittiviteetin imaginaari- ja reaali-osien osamääränä kaavan 2.5 mukaan. Häviökerroin sisältää eristeen kokonaishäviöt, jotka koostuvat sen dielektrisistä häviöistä ja johtavuushäviöistä ja kertoo eristeen tehohäviöiden suhteesta sen tuottamaan kapasitiiviseen loistehoon [10, s.

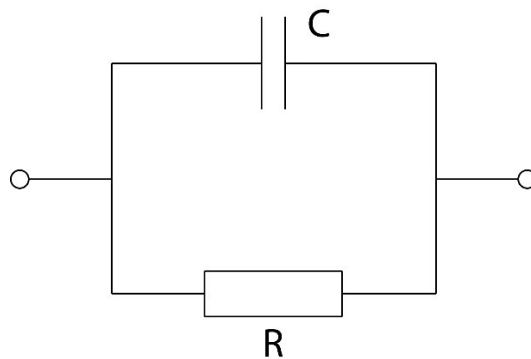
15]. Käytännön eristeillä häviökerroin on eristeen johtavuutta merkityksellisempi suure, koska johtavuus ja vuotovirta ovat yleensä hyvin pieniä. Eristeen kokonaishäviöt ovat yleensä hyvin pienet polarisaatioon verrattuna [2, s. 52], jolloin voidaan merkitä $\epsilon \approx \epsilon'$.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \approx \frac{\epsilon''}{\epsilon}, \quad (2.5)$$

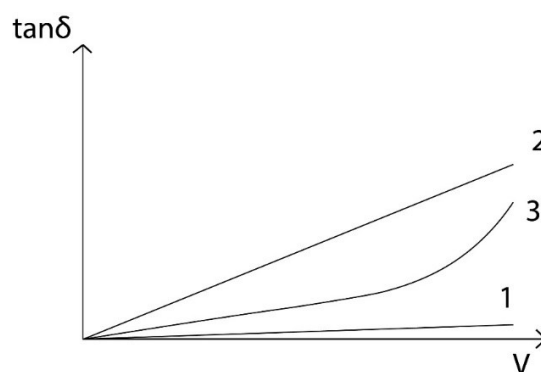
missä

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.6)$$

Kaavan 2.6 mukaisesti eristeen permittiviteetti on kompleksinen. Vaihtojännitteillä eriste voidaan mallintaa kapasitanssin ja resistanssin rinnankytkentänä kuvan 2.5 mukaisesti. Mitattaessa eristeitä häviökulma mitataan jännitteen funktiona ainakin koekappaleen nimellisjännitteeseen asti [5, s. 25]. Kuvassa 2.6 on esitettyä periaatteellisia häviökertoimen käyrämuotoja jännitteen suhteen.



Kuva 2.5 Eristyksen kapasitanssista ja resistanssista koostuva sijaiskytkentä.



Kuva 2.6 Häviökertoimen periaatteellisia käyrämuotoja jännitteen suhteen. 1) Kunnossa oleva eriste. 2) Vanhentunut eriste. 3) Osittaispurkauksia tuottava eriste.

Kuvassa käyrä 1 kuvaa kunnossa olevan eristeen häviökerrointa. Jännitteen mukana kasvava vuotovirta ja dielektriset häviöt ovat hyvin pieniä ja häviökertoimen arvo kasvaa vain hieman jännitettä suurennettaessa. Käyrä 2 kuvaa tilannetta, jossa eriste on

vanhentunut ja vuotovirta suuri. Osittaispurkaukset voivat näkyä häviökerroinmittauksessa käyrän 3 mukaisesti. Tietyllä jännitteen arvolla syttyy purkauksia ja häviöt kasvavat purkausvirran ansiosta jyrkästi. Osittaispurkauksista ei saada häviökertoimen mittauksella edellä mainittua tarkempaa tietoa [5, s. 25].

Häviökulma ilmaisee suoraan dielektristen häviöiden suhteellisen suuruuden. Jos dielektriset häviöt kasvavat liian suuriksi häviöteho saattaa lämmittää eristettä liikaa ja johtaa sen termiseen läpilyöntiin eristeen johtavuuden kasvaessa lämpötilan mukana. [2, s. 191]

Eristeen kuntoa arvioidessa voidaan eristysrakenteen tyypistä riippuen käyttää apuna häviökertoimen mittauksen lisäksi vesipitoisuuden, eristysresistanssin, vuotovirran ja osittaispurkausten mittauksia. Mittaustulosten tulkinta vaatii kokemus- ja tutkimusperäistä tietoa siitä, miten mitattava suure on yhteydessä eristeen vanhenemiseen [2, s. 184]. Lisäksi eristeet vaurioituvat eri lailla riippuen eristysrakenteesta, niihin kohdistuvien rasitusten laadusta ja siitä, millaisessa laitteessa eristettä käytetään [5, ss. 9-15].

Tämän työn aihepiiriin liittyy osittaispurkausten aiheuttama eristeiden vanheneminen. Eri eristemateriaalit kestävät osittaispurkauksia eri lailla. Esimerkiksi useat lasi- tai keraamiset eristeet kestävät osittaispurkauksia hyvin, mutta niiden materiaali on painavaa ja ne ovat hauraita. Polymeerieristeet ovat kevyempiä, helpompia ja halvempia valmistaa sekä kestävät myös paremmin ilkivaltaa. Lisäksi ulkokäytössä polymeerit kestävät paremmin ilmansaasteista johtuvaa räsitusta. Polymeerieristeet eivät kuitenkaan yleensä kestä osittaispurkauksia kovin hyvin [11, s. 1444].

Enston tässä työssä tutkittavan lämpökutistepäätteen pintaletku on tehty kestäväseen hyvin pintapurkauksia ja pintavirtoja, koska pintapurkauksilta ei voida välttyä ulos asennettavan eristyksen pinnalla [6, s. 13], mutta päätteen sisällä olevassa kaapelin pääeristeessä ei sallita lainkaan osittaispurkauksia. Hitaan materiaaliuutoksista johtuvan vanhenemisen lisäksi polymeerieristeiden elinkaari voi lyhentyä, jos niissä syntyy sisäisiä osittaispurkauksia, jotka rappeuttavat ja kuluttavat eristettä paikallisesti [12, s. 1206]. Osittaispurkausmekanismeja ja osittaispurkausten mittausta käsitellään tarkemmin luvussa 3.

2.5 Läpilyönti kiinteässä eristeessä

Läpilyönti voi tapahtua kiinteässä eristeessä, jos vapaiden varauksenkuljettajien määrä kasvaa riittävän suureksi. Tämän oletetaan johtuvan sähkökentän voimakkuuden aiheuttamasta varauksenkuljettajien määrän kasvusta sekä elektrodipinnoilla, että eristeessä. [2, s. 124] Vapaiden varauksenkuljettajien liikkuvuus voi kasvaa myös eristeen vanhetessa sen hapettumisen seurauksena [8, s. 1546]. Läpilyöntiin eristeessä

vaikuttaa eristeen ikääntymisaste, siihen kohdistuvat mekaaniset, sähköiset ja kemialliset rasitukset, sekä lämpörasitus.

Tärkeimpiin läpilyöntimekanismeihin lukeutuu muun muassa sähkömekaaninen läpilyönti, sähköläpilyönti, osittaispurkausläpilyönti ja lämpöläpilyönti. Sähkömekaaninen läpilyönti liittyy kahden elektrodin toisiinsa ja niiden välissä olevaan eristeeseen kohdistamaan mekaaniseen voimaan. Staattinen voimavaikutus syntyy tasajännitteellä ja tarpeeksi suurella sähkökentän voimakkuudella sekä sopivalla eristeellä on mahdollista, että eriste puristuu kasaan ja läpilyönti tapahtuu eristeen läpi elektrodien välillä [4, ss. 9-10].

Lämpöläpilyönnin tapauksessa eristeen lämpeneminen joko kauttaaltaan tai paikallisesti aiheuttaa sen pehmenemisen ja vapaiden varauksenkuljettajien määrän kasvua. Jos eristeeseen tuleva lämpövirta on suurempi, kuin siitä poistuva lämpövirta, eriste lämpenee entisestään, sen johtavuus kasvaa ja tilanne johtaa lopulta lämpöläpilyöntiin [13, s. 311]. Lämpöläpilyönti voi tapahtua, jos esimerkiksi kaapelin läpi ajetaan liian suurta virtaa, jonka aiheuttama lämpö kaapelin johtimessa nostaa kaapelin lämpötilan yli sen lämpenemisen ja jäähtymisen tasapainotilan. Myös kaapelieristeen dielektriset häviöt lämmittävät kaapelia jatkuvasti sen ollessa jännitteisenä.

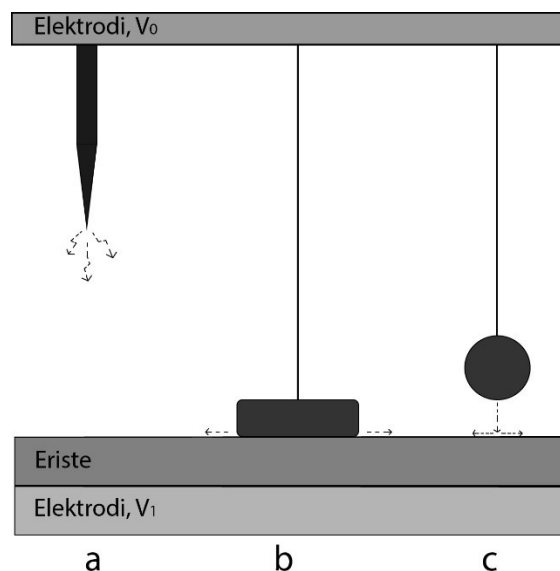
Sähköläpilyönti on tavallisesti eristeissä esiintyvä läpilyöntimekanismi [2, s. 124]. Sähköläpilyönnin, kuten muidenkin läpilyöntien, syntymiseen vaikuttavat monet tekijät. Lämpötilan nousu pehmentää eristettä sekä aiheuttaa sen johtavuuden ja vuotovirran kasvua. Polymeerieristeiden läpilyöntilujuus pääsääntöisesti pienenee lämpötilan kasvaessa [14, s. 496]. Mekaaniset rasitukset voivat haurastuttaa eristeen rakennetta ja synnyttää siihen halkeamia. Eristeessä voi myös olla jo valmistuksessa sen sisään jääneitä epäpuhtauksia ja epähomogeenisuuskohtia. Läpilyöntikanava kulkee eristeen läpi elektrodilta toiselle mutkitellen. Kanavassa voi myös olla sivuhaaroja.

Sähköläpilyönnin syntymiselle on esitetty useita teorioita ja siihen luultavasti vaikuttaakin monta eri mekanismia yhtä aikaa. Vapaita varauksenkuljettajia on eristeissä hyvin vähän. Kuitenkin niitä voi kulkeutua eristeeseen elektrodeilta korkean paikallisen sähkökentän vaikutuksesta tai syntyä eristeessä esimerkiksi säteilyn aiheuttaman sysäysionisaation ansiosta [15, s. 873]. Kun eristeessä on riittävästi vapaita varauksenkuljettajia, niillä on tarpeeksi liikkumistilaa ja sähkökentän voimakkuus on sopiva, elektroneilla on riittävästi kineettistä energiaa irrottaa eristeestä lisää elektroneja [15, s. 873]. Eristeen johtavuus ja vuotovirta voi kasvaa, minkä vuoksi myös eristeen lämpötila voi nousta paikallisesti ja aiheuttaa läpilyönnin. Sähköläpilyönti tapahtuu lämpöläpilyönnin tavoin nopeasti, kun eristemateriaalin ominaisuudet ylittävät kriittiset rajat.

Osittaispurkausläpilyönti alkaa usein eristemateriaalissa olevasta sisäisestä kaasuontelosta. Kun ontelossa on syntynyt sen seinämiä kuluttavia osittaispurkauksia tarpeeksi pitkän aikaa, purkaus voi alkaa kaivautua ontelon ulkopuolelle. Tällainen sähköpuun muodostuminen alkaa usein jostakin ontelon epätasaisesta pisteestä ja johtuu purkausten vapauttamien ionien ja elektronien aiheuttamasta ontelon seinämien kulumisesta. Ontelossa voi tapahtua osittaispurkauksia kauan ennen varsinaisen sähköpuun muodostumista, mutta sähköpuuvaiheessa osittaispurkausläpilyönnin kehittyminen nopeutuu [12, s. 1209]. Kaikkien sisäisten ja ulkoisten rasitusten voimakkuuden lisäksi myös rasitusaika vaikuttaa läpilyönti-ilmiöihin. Osittaispurkausten tapauksessa sähköisen rasituksen kestoajalla voi olla suuri vaikutus purkausaktiiviteettiin eri jännitteillä.

3. OSITTAISPURKAUKSET JA NIIDEN MALLINTAMINEN

Osittaispurkaus on sähköinen purkaus joka ei aiheuta suoraa läpi- tai ylilyöntiä eristemateriaalissa. Osittaispurkauksia voi syntyä usealla eri mekanismilla ja ne luokitellaan sisäisiin purkauksiin, pintapurkauksiin eristeen pinnalla sekä koronapurkauksiin johtimen pinnalla. [5, s. 27] Purkauksia voi syntyä kaasun lisäksi myös nestemäisessä ja kiinteässä eristeessä tai näiden rajapinnoilla. Tässä työssä käsitellään ainoastaan vaihtojännitteellä tapahtuvia osittaispurkauksia. Kuvassa 3.1 on esitettyjä otollisia tilanteita pinta- ja koronapurkauksille.



Kuva 3.1 a) Koronapurkaus terävän kappaleen kärjessä. b) Pintapurkauksia elektrodin reunalla. c) Pintapurkauksia sarjaeristyksessä eristeen pinnalla.

Kaikkiin ulkoisiin vaihtojännitteellä tapahtuviin purkaustyyppeihin vaikuttavat sähkökentän voimakkuuden ja ilmansaasteiden määrän lisäksi myös ilmanpaine, ilmankosteus ja lämpötila. Lisäksi osittaispurkauksiin ja kaapelin tai kaapelipäättteen sähköiseen rasitukseen vaikuttaa myös jännitteen aaltomuoto [16, s. 2]. Jännite voi olla tämän työn mittauksissa käytettävän jännitteen tavoin sinimuotoista, mutta myös erilaiset syöksyjännitteet, impulssit ja tehoelektroniikasta verkkoon välittyvät, muitakin kuin 50 Hz taajuuskomponentteja sisältävät jännitteet ovat mahdollisia ja voivat vaikuttaa purkausten syttymiseen.

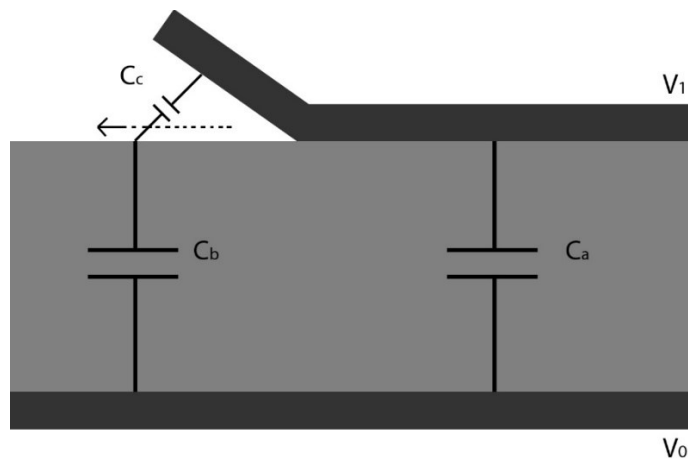
Osittaispurkauksia on mahdollista havainnoida suoran galvaanisen mittaamisen lisäksi äänen ja virtapulssien aiheuttaman sähkömagneettisen säteilyn avulla. Sähkömagneettinen säteily näkyy esimerkiksi valoilmiöinä [17, s. 1]. Laboratoriomittauksissa käytetään galvaanista kytkentää ja tarkoitukseen soveltuvaa, herkkää mittalaitteistoa, joka tallentaa niin kutsutun PRPDA-kuvion (*'Phase Resolved Partial Discharge Analysis'*) ja purkausten voimakkuuden sekä lukumäärän vaihtojännitteen vaiheen suhteen. PRPDA-kuviota kutsutaan myös ϕ -q-jakaumaksi.

3.1 Pintapurkaus

Pintapurkaus on purkaus, joka syntyy kahden eristeen rajapinnalla. Useimmin pintapurkauksia syntyy kiinteän ja nestemäisen eristeen tai kiinteän ja kaasueristeen rajapinnalla. Purkaus syttyy, jos eristeen pinnan suuntainen sähkökentän voimakkuus on riittävän suuri. Suurempi jänniterasitus aiheuttaa pidemmän purkauksen ja jos jänniterasitus tai purkauksen kesto-aika on liian suuri, purkaus voi johtaa ylilyöntiin. [6, s. 12]

Pintapurkauksen syttymisjännite riippuu kiinteän eristeen permittiviteetistä ja eristysrakenteen geometriasta. Paksumpi kiinteä eriste ja sen pienempi permittiviteetti vähentävät purkauksen syttymisriskiä. Pintapurkauksia syttyy esimerkiksi kaapelipääteissä ja läpivienneissä [4, s. 10]. Ilmankosteus vaikuttaa purkauksen syttymiseen eri lailla kuin esimerkiksi koronapurkauksen syttymiseen. Ilmankosteuden kasvu nostaa ilman läpilyöntilujuutta ja vähentää koronapurkauksen syttymisen todennäköisyyttä kunnes kosteus alkaa tiivistyä pisaroiksi joko ilmassa tai eristeen pinnalla. Sähkökentän suuntaisen kahden eristeen rajapinnan tapauksessa eristeen pinnalle kondensoituneet nestepisarot pienentävät pintapurkauksen syttymiskentänvoimakkuutta. Jos eristeen pinta on saastunut esimerkiksi meren rannalla suolasta tai muusta ilman tai sateiden mukana eristeen pinnalle kertyneestä materiaalista, purkausten syttyminen on entistä todennäköisempää. [6, s. 12]

Pintapurkauksia voidaan mallintaa kolmikapasitanssimallilla, kuten myös ontelo- ja koronapurkauksia. Kuvassa 3.2 on esitettyä pintapurkausten mallintamiseen soveltuva kolmikapasitanssimalli.



Kuva 3.2 Pintapurkauksen kolmikapasitanssimalli.

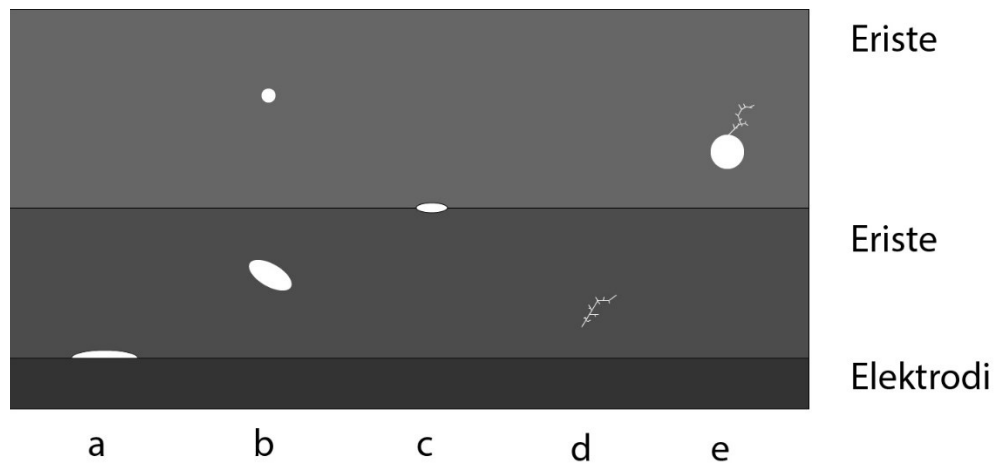
Kaapelipääteissä tapahtuvat pintapurkaukset voivat olla pitkällä aikavälillä eristeelle vaarallisia. Lämpötila purkauksen juuressa voi olla hyvin korkea, vaikka itse purkaus olisikin laajuudeltaan pieni [6, s. 12]. Purkaus kuluttaa ja mahdollisesti myös hiililyttää eristemateriaalin pintaa rikkomalla eristeen molekyyliketjuja ja luomalla siihen sähköä johtavia väyliä jotka ajan myötä pitenevät ja voivat johtaa ylilyöntiin. Kaapelipääteiden pintaeristysmateriaalien on oltava varsinkin ulko-olosuhteisiin asennettavissa kaapelipääteissä pintapurkauksia kestävää materiaalia, koska ilmansaasteet ja esimerkiksi sade voivat luoda pintapurkauksille otollisia olosuhteita. Lisäksi ulko-olosuhteisiin asennettavissa pääteissä käytetään usein laippoja jotka pidentävät pintavirtojen ryömintämatkaa pinnoilla mahdollisesti esiintyvän veden ja lian vuoksi.

3.2 Ontelopurkaus

Pintapurkauksen ohella toinen kaapelipääteissä mahdollisesti esiintyvä haitallinen purkaustyyppi on ontelopurkaus. Kaapelin eristemateriaaleihin voi jäädä valmistusprosessissa kaasunteloita, joissa olevan kaasun permittiviteetti on huomattavasti eristemateriaalin permittiviteettiä alhaisempi. Onteloita voi muodostua eristeeseen myös mekaanisen rasituksen tai eristekerrosten välille kaapelipääteen huolimattoman asennuksen seurauksena. Permittiviteettien erosta johtuen ontelossa vaikuttava suurempi jänniterasitus saattaa ylittää ontelossa olevan kaasun jännitelujuuden ja aiheuttaa osittaispurkauksia. Purkausten syttymiseen ja purkaustaajuuteen vaikuttaa ontelon koko, muoto ja sijainti eristysrakenteessa [18, s. 4]. Osittaispurkausten toistumistaajuuden lisäksi niiden voimakkuus ja vaikutusaika vaikuttavat eristeen vahingoittumiseen. [19, s. 20]

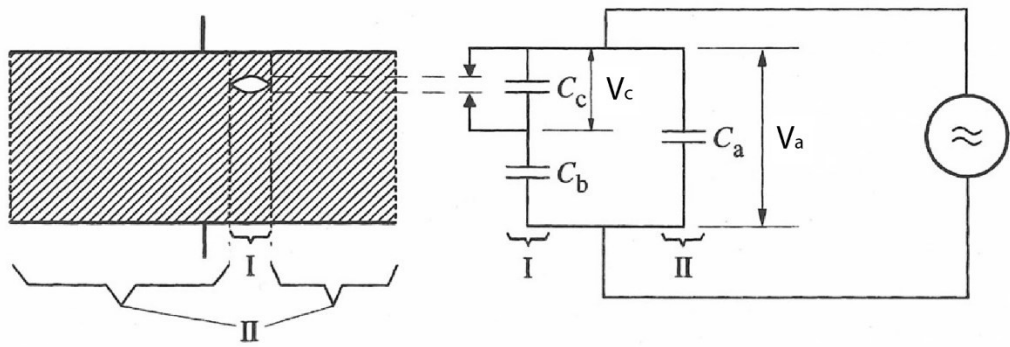
Ontelossa tapahtuvat osittaispurkaukset kuluttavat ontelon seinämiä aiheuttaen eroosiota. Purkausten vaikutuksesta tapahtuvien kemiallisten reaktioiden seurauksena saattaa myös muodostua eristettä edelleen syövyttäviä kemiallisia yhdisteitä.

Ontelopurkauksen eteneminen alkaa ontelon seinien tasaisesta vaurioitumisesta. Myöhemmin ontelo alkaa kulua epätasaisemmin ja sen seinämiin syntyy syvennyksiä, joihin purkaukset keskittyvät. Syvennykset laajenevat johtaviksi kanaviksi eristeen sisälle ja muodostavat lopulta puumaisen kuvion, sähköpuun. Ontelopurkauksen edettyä sähköpuuvaiheeseen purkauksen eteneminen kiihtyy [12, s. 1209] ja sähköpuun muodostuessa tarpeeksi suureksi elektrodien välille syntyy läpilyönti ja kanava alkaa johtaa sähköä helposti [2, s. 181]. Ensimmäisen läpilyönnin ja eristeen vaurioitumisen jälkeen uudet purkaukset ja läpilyönnit syttyvät samassa purkauskanavassa huomattavasti alhaisemmilla jännitteillä [4, s. 13]. Sähköpuu voi syntyä eristeen sisäisen sähköpuun lisäksi myös elektrodin ja eristeen rajapinnalle [10, s. 25]. Kuvassa 3.3 on esitettyä erilaisia ontelopurkauksia mahdollisesti aiheuttavia materiaaliveirheitä.



Kuva 3.3 Eristysrakenteessa olevia osittaispurkauksille alttiita vikapaikkoja. a) Kaasuontelo elektrodin ja eristeen rajalla. b) Eristeen sisäisiä onteloita. c) Ontelo kahden eristeen rajalla. d) Sähköpuu. e) Ontelosta kehittynyt sähköpuu.

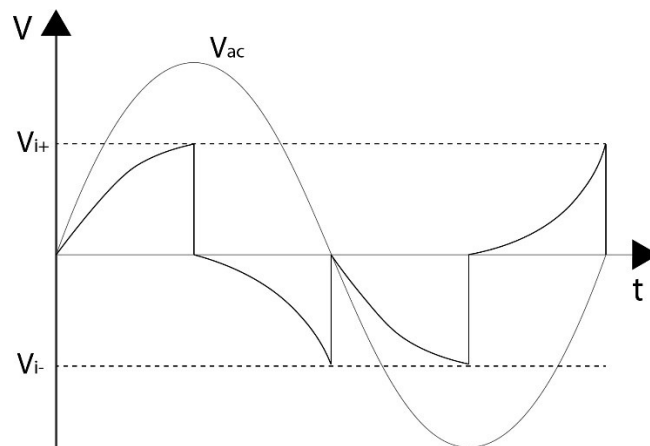
Sisäistä ontelopurkausta voidaan havainnollistaa yksinkertaisen, kaasuontelon sisältävän eristysrakenteen avulla. Ontelon sisältävää eristerakennetta voidaan kuvata kolmikapasitanssimallilla koska ulkoinen piiri ei ehdi vaikuttaa osittaispurkausilmiöön sen suuren nopeuden vuoksi. [10, s. 27] Kuvassa 3.4 on esitettyä onteloja sähköisesti kuvaava kolmikapasitanssimalli. Kuvassa C_c on ontelon kapasitanssi, C_b ontelon kanssa sarjassa olevan eristyksen kapasitanssi ja C_a jäljelle jäävän eristyksen osan kapasitanssi.



Kuva 3.4 Eristysrakenteessa oleva ontelo ja kokonaisuutta kuvaava kolmikapasitanssimalli. Muokattu lähteestä [2, s. 78]

Ontelon jännite on verrannollinen koko eristysrakenteen yli vaikuttavaan jännitteeseen. Vaihtojännite jakautuu rakenteessa käänteisesti kapasitanssien suhteessa. Koska ontelon permittiviteetti on yleensä pienempi kuin ympäröivän eristeen, siihen vaikuttava sähkökentän voimakkuus on tällöin suurempi.

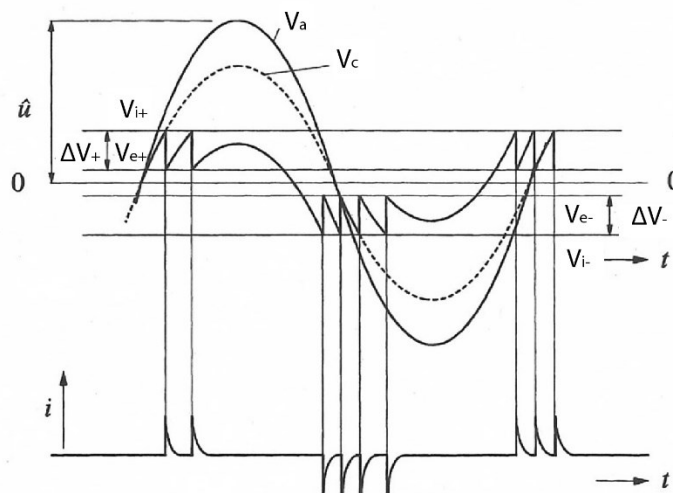
Ontelopurkaus syttyy, kun eristerakenteen ja ontelon yli oleva vaihtojännitteen arvo kasvaa tarpeeksi suureksi. Purkaus syttyy sekä jännitteen positiivisella, että negatiivisella puolijaksolla. Kun purkaus on syttynyt, varausta siirtyy ontelon puolelta toiselle, jolloin ontelon jännite pienenee ja lopulta sammuu. [2, s. 77] Purkausten lukumäärä ja taajuus riippuu ontelon yli vaikuttavasta jännitteestä [4, s. 11]. Kuvassa 3.5 on esitettyä jännitteen ja virran aaltomuodot eräälle sisäiselle osittaispurkaukselle.



Kuva 3.5 Eristeessä olevan kaasuontelon jännitteenmuutos ontelopurkauksen syttymisjännitteen ollessa sama, kuin ontelon yli vaikuttavan jännitteen huippuarvo. Kuva muokattu lähteestä [2, s. 78].

Kuvassa 3.5 V_{ac} esittää eristysrakenteen yli vaikuttavaa vaihtojännitteen aaltomuotoa vahvennetun käyrän esittäessä pelkästään ontelon yli vaikuttavaa jännitettä. V_{i+} ja V_{i-} esittävät ontelopurkauksen syttymisjännitteitä positiivisella ja negatiivisella puolijaksolla.

Ontelon jännite kasvaa vaihtojännitteen mukana, kunnes ontelopurkaus syttyy ensimmäisen ja toisen puolijakson huippukohdissa. Kun purkaus syttyy, varausta siirtyy ontelon puolelta toiselle ja ontelon jännite putoaa äkillisesti vaihtojännitteen arvoon nähden ja lähtee muuttumaan taas ontelon yli vaikuttavan jännitteen mukana. Jos ontelossa vaikuttavan jännitteen huippuarvo on yhtä suuri kuin purkausten syttymisjännite, ontelossa tapahtuu tasan neljä purkausta yhden verkkojakson aikana kuvan 3.5 mukaisesti jännitteillä V_{i+} ja V_{i-} [2, s. 77]. Jos jännite on purkausten syttymisjännitettä suurempi, purkauksia tapahtuu enemmän [4, s. 11]. Kuvassa 3.6 on esitettyä purkausten lukumäärän kasvu jännitteen suurentumisen seurauksena.



Kuva 3.6 Purkausten lukumäärän suurentuminen jännitteen mukana. Ontelon jännitteen muutos (ΔV_+ , ΔV_-) on syttymisjännitteen (V_{i+} , V_{i-}) ja sammumisjännitteen (V_{e+} , V_{e-}) erotus. Kuva muokattu lähteestä [2, s. 79]

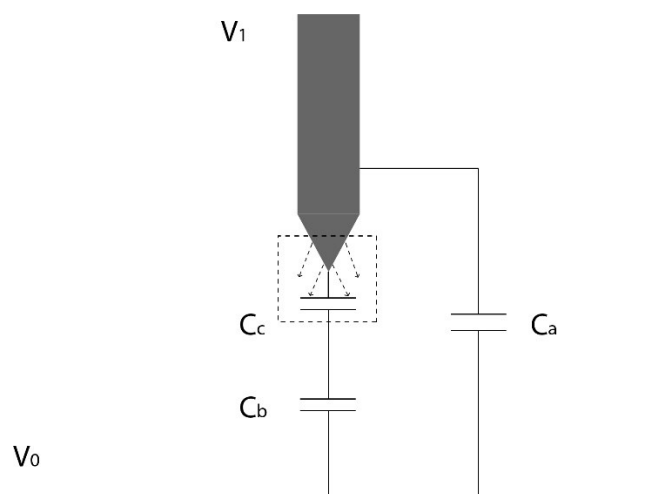
Osittaispurkauksia voi syttyä myös syttymisjännitettä pienemmällä jännitteellä sen jälkeen, kun purkaus on ensin syttynyt vaaditulla syttymisjännitteellä. Purkausten jatkuminen riippuu eristysrakenteen ja ontelon yli vaikuttavista jännitteistä, syttymis- ja sammumisjännitteistä sekä ontelon muodosta ja sijainnista. Lisäksi ontelossa tai sen kaasussa tapahtuvat kemialliset ja fysikaaliset muutokset voivat vaikuttaa purkausaktiiviteettiin, jos kaasun tai ontelon paine, lämpötila tai johtavuus muuttuu. Ontelopurkauksen syttymisjännite voi myös olla erilainen ontelon yli vaikuttavan jännitteen positiivisella ja negatiivisella puolijaksolla, jos ontelo on sijoittunut sopivasti ja on geometrisesti epäsymmetrinen. [4, s. 12]

Jos eristeen sisälle pääsee vettä, on mahdollista, että sähkökentän ja veden läsnä ollessa alkaa muodostua sähköpuuta vastaava kuvio, vesipuu. Vesipuu kasvaa sähkökentän suuntaisesti ja pyrkii aiheuttamaan läpilyönnin eristeen läpi vaihe- ja nollajohtimien välille. Vesipuu voi lähteä kasvamaan keskeltä eristettä tai eristeen ulkopinnalta kohti eristeen keskustaa ja toista elektrodia [10, s. 24]. Vesipuun kasvu voidaan pysäyttää, jos kaapeli saadaan kuivattua. Vesipuiden havainnointiin voidaan tarvita kaapelin dielektrisen vasteen ja polarisoitumisen mittaamista, sillä ne eivät yleensä aiheuta osittaispurkauksia ja eivät siten näy osittaispurkausmittauksissa [2, s. 185].

3.3 Koronapurkaus

Koronapurkaus syntyy kaasussa johtavaa materiaalia olevan elektrodin pinnalla, jos elektrodi on sen muotoinen, että sen pinnan lähelle syntyy voimakas sähkökentän tihtentymä. Koronapurkaus voi syttyä myös maadoitetun johteen pinnalle, jos sen lähelle tuodaan riittävän suuri sähkökentänvoimakkuus. Tyypillisin koronapurkauksen muoto on suurijännitteisillä sähkönsiirtojohtoilla pakkasella tapahtuva ilmiö, jossa johtimen pinnalle kerääntyneestä kuurasta purkautuu varausta ympäröivään ilmaan. Koronapurkaus ei myöskään ontelo- ja pintapurkausten tavoin muodosta yhtenäistä purkauskanavaa vaan se päättyy väliaineeseen. Kuvassa 3.1a on esitettyä koronapurkauksen muodostumiselle otollinen rakenne.

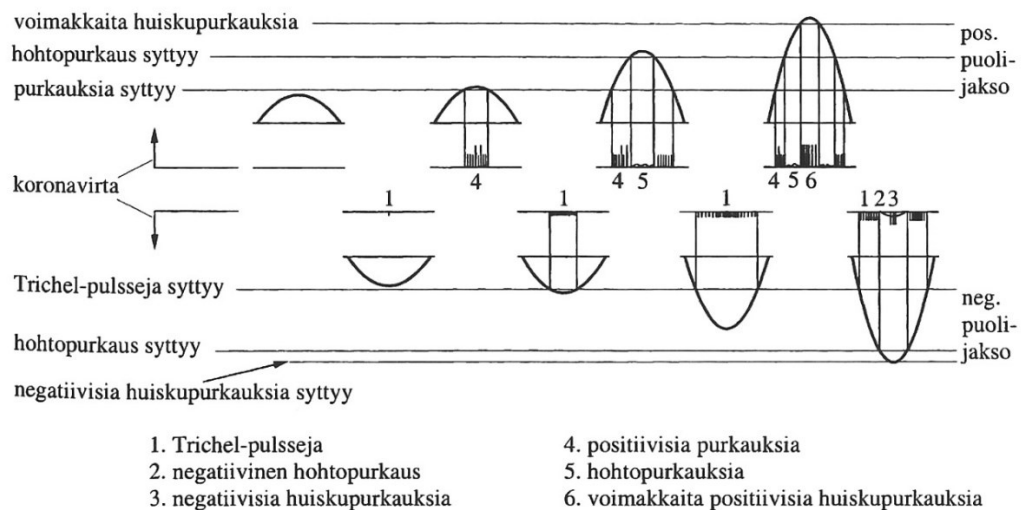
Koronapurkausta voidaan ontelopurkauksen tavoin tarkastella myös kolmikapasitanssimallin avulla kuvan 3.7 mukaisesti. Malli ei kuitenkaan ennusta purkausten toistuvuutta [2, s. 86]. Koronapurkauksen kolmikapasitanssimallissa C_a kuvastaa elektrodin ja maan välistä kapasitanssia, C_b purkauksen ja maan välistä kapasitanssia sekä C_c purkauksen sisäistä kapasitanssia.



Kuva 3.7 Koronapurkauksen kolmikapasitanssimalli.

Koronapurkaus syttyy tyypillisesti ensin negatiivisella puolijaksolla, koska kentänvoimakkuus on silloin avaruusvarauksen syntymisen vuoksi suurempi. Suuremmilla jännitteillä purkauksia syttyy myös jännitteen positiivisella puolijaksolla. Alussa purkauksia esiintyy vain yksi jakso kohden, mutta kun jännitettä nostetaan, purkausten suuruus pysyy samana ja niiden lukumäärä kasvaa. Koronapurkauksia esiintyy vaihtojännitteen puolijakson huipun kohdalla [10, s. 29], kun taas ontelo- ja pintapurkauksia esiintyy pääasiassa jännitteen nousevalla ja laskevalla osalla. [2, s. 86]

Syttymishetkestä lähtien jännitettä nostettaessa koronailmiö näkyy hieman erilaisena eri jännitteillä. Aluksi korona syttyy negatiivisella jännitteen puolijaksolla ja se näkyy niin kutsuttuina Trichel-pulsseina, jotka ovat hyvin lyhyitä purkauksia. Trichel-pulssin puoliarvonaika voi olla luokkaa 100 ns ja virta 10 nA pienessä kärjessä tai 20 mA suuressa elektrodissa. Lisäksi pulssien lukumäärä voi olla tuhansia tai miljoonia sekunnin aikana [2, s. 86]. Jännitettä edelleen nostettaessa Trichel-pulssit yhdistyvät hohtopurkaukseksi joka näkyy mittalaitteistolle tasavirtana ja ihmisilmälle kirkkaana valopisteenä. Hohtopurkaus laajenee edelleen huiskupurkauksiksi, kun jännitettä nostetaan lisää. Yksittäiset huiskupurkaukset kerrostuvat tasaisen hohtopurkauksen päälle ja niiden pulssitaajuus voi olla luokkaa 50 kHz. [2, s. 87] Kuvassa 3.8 on esitettyä koronapurkauksen ilmeneminen jännitettä suurennettaessa.



Kuva 3.8 Esimerkkejä koronan ilmenemismuodoista eri napaisuuksilla jännitettä suurennettaessa. [2, s. 87]

Koronapurkauksia tutkitaan pääasiassa sähkönsiirtoon käytettävien avojohtojen tapauksessa sähkönsiirtohäviöiden minimoimisen vuoksi [10, s. 29]. Koronahäviöt voivat olla hyvällä säällä saman suuruisia, kuin esimerkiksi eristinpintojen vuotojohtavuudesta aiheutuvat häviöt. Jos sää on erittäin huono, koronahäviöt voivat olla yhtä suuret kuin johtimien virtalämpöhäviöt. [2, s. 91]

3.4 Osittaispurkausten mittaus

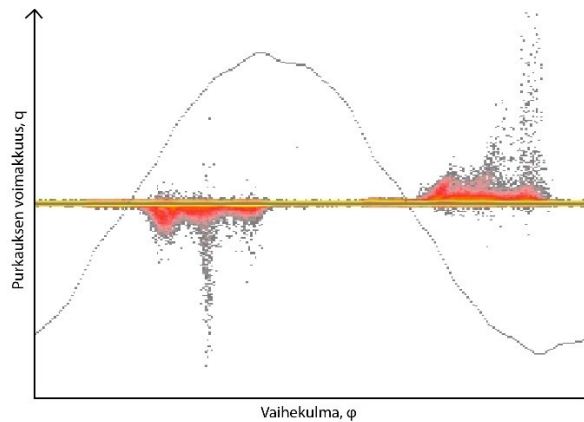
Osittaispurkauksia voidaan havainnoida ja paikantaa useilla erilaisilla menetelmillä. Menetelmistä niin kutsuttu galvaaninen osittaispurkausmittaus on sähköinen menetelmä, jolla voidaan mitata hyvin pieniä osittaispurkauksia. Osittaispurkaus- eli PD-mittauksessa eristysrakenteen yli kytketään jännite ja sen rinnalle kytkentäkondensaattori. Kun eristyksessä tapahtuu purkaus, sen suuritaajuinen virtapulssi kiertää kytkentäkondensaattorin kautta ja se pystytään mittaamaan.

Voimakkaapeleita koskevassa standardissa IEC 60502-2 on määritelty tarkasti, millaisissa olosuhteissa mittauksia tulee suorittaa koska olosuhteet voivat vaikuttaa merkittävästi osittaispurkausten esiintymiseen. Lisäksi mittaukset suoritetaan samanlaisina kaikille koekappaleille, jotta tulokset ovat vertailukelpoisia. Osittaispurkaustestit tulee suorittaa lämpötilassa $20\text{ °C} \pm 15\text{ °C}$. Koejännitteen taajuuden tulee olla välillä 49-61 Hz ja jännitteen aaltomuodon pääosin sinimuotoista. Lisäksi yksivaiheisille kaapeleille on määrätty, että kaapeli pidetään jännitteisenä 5 minuuttia testin aikana ja, että jännite kytketään vaiheen ja kosketussuojan välille. Tässä työssä tehdään mittauksia huonelämpötilan lisäksi myös kuumissa ja kylmissä olosuhteissa ja tutkitaan vikojen lisäksi myös lämpötilan vaikutusta osittaispurkauksiin.

Osittaispurkauksen suuruutta kuvataan näennäisvarauksella q ja sen suuruus ilmoitetaan tavallisesti picocoulombeina. Näennäisvarausta käytetään, koska osittaispurkauksen tarkkaa suuruutta ei pystytä suoraan mittaamaan eristeen ulkopuolelta. Näennäisvaraus vastaa sitä varausta, joka aiheuttaa mitattavan eristysrakenteen navoissa saman suuruisen jännitteen muutoksen, kuin siinä tapahtuva osittaispurkaus [5, s. 26]. Sen vuoksi myös eristeen ontelon kanssa rinnan oleva muu kapasitanssi vaikuttaa näennäisvarauksen suuruuteen. Koska osittaispurkausten suuruus ja lukumäärä voi riippua jännitteestä, niiden syttymis- ja sammumisjännitteet ovat myös tärkeitä suureita. Standardin IEC-60270 mukaan syttymisjännite V_i on se jännite, jolla toistuvia osittaispurkauksia syttyy ensimmäistä kertaa jännitettä nostettaessa ja sammumisjännite V_e taas on määritelty jännitteeksi, jolla osittaispurkausten toistuva ilmeneminen loppuu.

Osittaispurkausmittauksessa lasketaan hetkellisen näennäisvarauksen, syttymis- ja sammumisjännitteiden lisäksi yleensä myös purkausten toistumistaajuus N , joka on määritelty purkausten lukumääränä sekunnissa. Lisäksi osittaispurkausten keskimääräinen purkausvirta ja niiden syttymishetki vaihtojännitteen vaiheen suhteen määritetään myös. Keskimääräinen purkausvirta I lasketaan kaikista mitatuista purkauksista keskiarvona ja purkausten syttymishetket, voimakkuudet ja lukumäärä voidaan piirtää esimerkiksi PRPDA-kuvana. Edellä mainituista suureista saadaan laskettua muita tunnuslukuja, joiden avulla purkauksia voidaan yrittää luokitella purkaustyyppin mukaan. Kuvassa 3.9 on esimerkki erään kaapelipääteen osittaispurkausten PRPDA-kuvasta. Vaaka-akselilla on jännitteen vaihekulma ja

pystyakselilla purkausten voimakkuus. Väri kertoo purkausten lukumäärän tietyllä purkausvoimakkuudella ja vaihekulmalla.



Kuva 3.9 Erään kaapelipäätteessä esiintyneen osittaispurkauksen PRPDA-kuva.

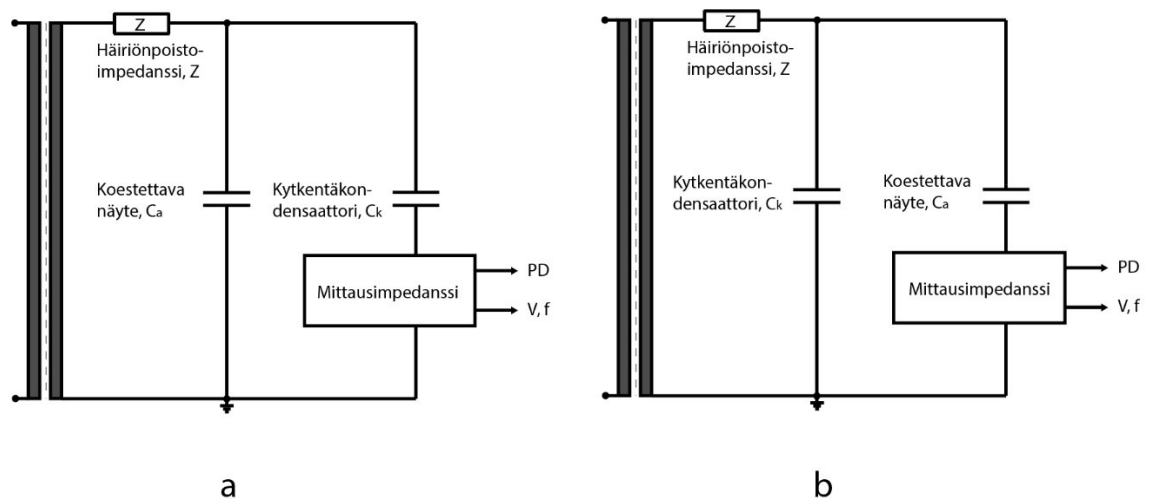
Edellä mainittujen tunnuslukujen lisäksi itse PRPDA-kuvasta ja sen tietoaaineistosta voidaan laskea muitakin tunnuslukuja. Tunnuslukujen perusteella purkauskuvioita voidaan luokitella niin kutsuttujen purkauskuvioiden 'sormenjälkien' mukaan ja esimerkiksi opettaa neuroverkkoja tunnistamaan tietyt purkaustyytit laajan sormenjälkikirjaston avulla. Yleisimmin käytettyihin tunnuslukuihin kuuluu esimerkiksi vinous 'skewness', huipukkuus 'kurtosis', huippujen lukumäärä 'peak', epäsymmetria 'asymmetry' ja ristikorrelaatiokerroin 'cross-correlation coefficient'. Näistä vinous, huipukkuus ja huippujen lukumäärä voidaan laskea molemmille puolijaksoille ja epäsymmetria sekä ristikorrelaatiokerroin koko PRPDA-kuviolle [20, s. 304].

Vinous S_k kertoo purkausjakauman suhteesta normaalijakaumaan. Symmetriselle jakaumalle vinous on nolla. Se saa positiivisen arvon, jos jakauma on kallistunut vasemmalle ja negatiivisen arvon jos jakauma on kallistunut oikealle. Huipukkuus K_u kertoo jakauman terävyydestä normaalijakaumaan nähden. Jos jakauma on terävämpi, kuin normaalijakauma, huipukkuus saa positiivisen arvon ja normaalijakaumaa litteämmässä tapauksessa negatiivisen. Epäsymmetria Q_a kertoo purkausjakauman positiivisen ja negatiivisen puolijakson aikana tapahtuneiden osittaispurkauksen kuvioiden poikkeaman nollakohdan suhteen symmetrisestä jakaumasta. Q_a saa arvon 1, jos jakauma on symmetrinen ja arvon <1 , jos jakauma on epäsymmetrinen. Ristikorrelaatiokerroin cc kuvaa positiivisen ja negatiivisen puolijakson aikana mitattujen purkauskuvioiden eroavuutta niiden muotojen suhteen. Ristikorrelaatiokerroin saa arvon 0, jos purkauskuviot eroavat toisistaan täydellisesti ja arvon 1 jos ne vastaavat toisiaan täydellisesti. [21]

Työssä käytettävä mittalaite laskee ja näyttää käyttöliittymässään edellä mainittuja tunnuslukuja. Niiden lisäksi otoksesta saadaan laskettua myös muun muassa purkausten

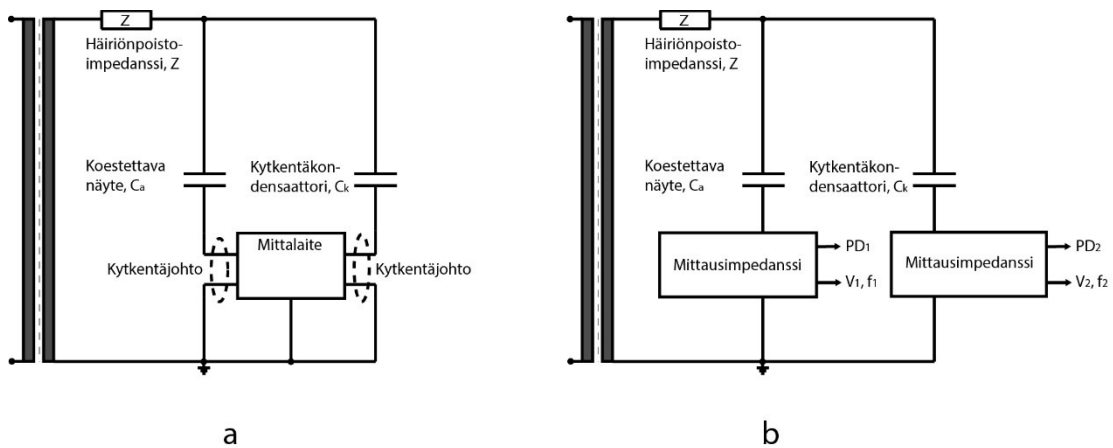
jakauma koejännitteen vaiheen suhteen purkausvoimakkuudesta ja purkausten lukumäärästä, sekä jakauma purkausten suuruudesta koko otoksesta.

Galvaanisia mittauspiirejä on erilaisia ja niillä voidaan mitata osittaispurkauksia eri taajuuskaistoilta ja erilaisista laitteista. Kuvissa 3.10 ja 3.11 on esitettynä neljä erilaista vaihtojännitemittauksissa käytettävää mittauspiiriä. Standardin IEC 60270 mukaan kuvissa olevat mittauspiirit ovat perustana suurimmalle osalle kaikista galvaanisista osittaispurkausten mittauspiireistä.



Kuva 3.10 PD-mittauspiirit, joissa a) mittausimpedanssi on sarjassa kytentäkon-densaattorin ja b) koestettavan näytteen kanssa.

Kuvassa 3.10a mittausimpedanssi on sarjassa kytentäkon-densaattorin kanssa, kun taas kuvassa 3.10b mittausimpedanssi on sarjassa koestettavan näytekappaleen kanssa. Tämän työn mittauksissa mittausimpedanssi on sarjassa kytentäkon-densaattorin kanssa. Kuvien 3.10a ja 3.10b mittauspiirit ovat yleisimmin käytettyjä osittaispurkausten mittauksessa ja ovat toisiaan vastaavia mittauksen kannalta. Mittausimpedanssi voidaan siis kytkeä sekä koestettavan näytteen, että kytentäkon-densaattorin kanssa sarjaan. Näitä mittauspiirejä käytetään perinteisessä PD-mittauksessa.



Kuva 3.11 PD-mittauspiirit, joissa a) tasapainotettu mittauskytkentä ja b) purkausten polariteetit erotteleva mittauskytkentä.

Kuvassa 3.11a on tasapainotettu mittauskytkentä ja kuvassa 3.11b mittauskytkentä, jolla pystytään erottelemaan osittaispurkausten polariteetit toisistaan. Tasapainotettua mittauskytkentää käytetään, jos halutaan vähentää ulkoisten häiriöiden vaikutusta piiriin. Kuvan 3.11b purkausten polariteetit erottelevaa mittauskytkentää käytetään myös ulkoisten häiriöiden poissulkemiseen, mutta siten, että mittalaite tunnistaa pulssin polariteetin perusteella tuleeko pulssi PD-lähteestä vai onko se ulkoinen häiriö.

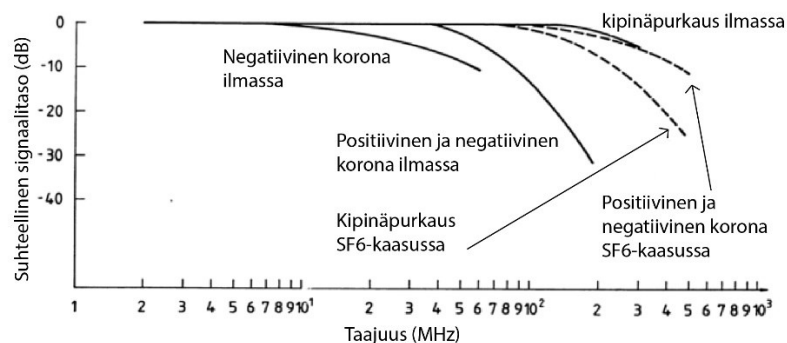
Pääasiassa standardin mukaiset mittauspiirit koostuvat siis vaihtojännitelähteestä, sen kanssa sarjassa olevasta induktanssista, kytentäkon-densaattorista, koekappaleesta ja mittausimpedanssista, joka muuttaa virtapulssit jännitesignaaleiksi ja välittää ne itse mittalaitteelle. Kytentäkon-densaattorin tulee olla matalainduktanssinen ja jännitelähteen sekä ympäristön ei tulisi tuottaa korkeita tasoja taustakohinaa. Sähköverkosta tulevia häiriöitä voidaan vähentää suotimella tai mittauspiirin kanssa sarjassa olevalla impedanssilla. Kuvassa 3.10a on esitettynä työssä käytetyn PD-mittauksen periaatekaavio.

Osittaispurkaus on luonteeltaan nopea transientti ilmiö minkä takia se tuottaa taajuustasossa mitattuna hyvin laajakaistaisen signaalin. Mittauspiirin on oltava sellainen, että mitattavasta signaalista saadaan poistettua verkon häiriöt, käyttöjännitteen taajuus ja sen harmoniset komponentit, sekä mahdollisesti muiden laitteiden tuottamat häiriöt. Verkkojännitteen taajuus ei ole lähellä standardinmukaista mitattavaa taajuuskaistaa, mutta esimerkiksi verkossa sähköisesti lähellä olevat suuritaajuiset liitäntälaitteet voivat aiheuttaa häiriöitä osittaispurkausmittauksiin.

Yleisimmin käytetyt laajakaistainen ja kapeakaistainen mittauskaista voidaan valita standardin IEC 60270 lisäyksen 1 mukaan seuraavasti: laajakaistaisen mittalaitteen ja siihen liittyvän mittausimpedanssin tulisi toimia f_1 osalta 30-100 kHz taajuudella ja f_2

osalta alle 1 MHz taajuudella. Taajuus f_1 on järjestelmän alempi rajataajuus ja taajuus f_2 ylempi rajataajuus. Valitun taajuuskaistan olisi oltava välillä 100-900 kHz. Kapeakaistaisessa mittauksessa taas valitaan jokin keskitaajuus f_m alueelta 50-1000 kHz ja sen ympärille taajuuskaista alueelta 9-30 kHz.

Käytännössä mittausjärjestelmän mittaama taajuuskaista on melkein aina kapeampi kuin itse osittaispurkauspulssin aiheuttaman signaalin kaista. Mittauksissa valitaan jokin sopiva mitattava kaista siten, että kaistalla ei ole muiden lähteiden aiheuttamia häiriöitä ja osittaispurkauspulssi saadaan tallennettua hyvällä herkkyydellä. Vaikka mittalaite käyttää mittaukseen pulssia kapeampaa kaistaa, saadaan osittaispurkauksen varaus kuitenkin laskettua oikein integroimalla mitattava pulssi. Joissakin tapauksissa saatetaan haluta mitata osittaispurkausten todellisia pulssimuotoja, mikä vaatii mittauspiirin rakentamisen hyvin laajakaistaiseksi ('ultra wide band measurement') sekä erityisen häiriöttömät olosuhteet mittausympäristöltä. Kuvassa 3.12 on esitettynä tyypillisiä osittaispurkausten taajuuskaistoja eri väliaineissa.



Kuva 3.12 Tyypillisiä eri osittaispurkausten taajuuskaistoja eri väliaineissa. Muokattu lähteestä [22].

Työssä käytettävässä, kuvan 3.10a mukaisessa mittauspiirissä jännite syötetään piiriin suurjännitemuuntajan kautta. Ensimmäinen komponentti syöttömuuntajan jälkeen on häiriönpoistoimpedanssi, jonka tehtävänä on suodattaa verkosta mahdollisesti mittauspiiriin pyrkiviä häiriöitä pois. Impedanssi myös estää mittauspiirissä syntyvien osittaispurkaussignaalien siirtymistä syöttävään verkkoon. Koestettava näytekappale kytketään kytkentäkondensaattorin ja mittausimpedanssin sarjaankytkennän rinnalle. Kytkentäkondensaattorin tehtävänä on muodostaa suuritaajuiselle osittaispurkaussignaalille paluureitti ja mahdollistaa mittausimpedanssin tekemä mittaus hallitulla jännitetasolla. Mittausimpedanssi liittyy suoraan itse osittaispurkausanalysaattoriin ja muodostaa kytkentäkondensaattorilta tulevasta signaalista osittaispurkausmittauksessa mitattavan jännitesignaalin. Mittausimpedanssin ja itse analysaattorin välissä on vielä esivahvistin, jonka vahvistuksen määrää ohjataan analysaattorin jännitesignaalin avulla. Esivahvistin rajoittaa mitattavaa taajuuskaistaa ja vahvistaa osittaispurkaussignaalia mittalaitetta varten sopivaksi.

Kun koestettava näyte on kytketty mittauspiiriin, piiri täytyy kalibroida ennen varsinaisen mittauksen aloitusta. Kalibrointi suoritetaan kytkemällä koekappaleen rinnalle tarkasti tiedettyä osittaispurkauspulssia tuottava kalibrointilaite. Tällöin mittauspiiri saadaan tarkimmilleen kalibroidun purkaustason ympäristössä. Standardissa IEC 60502-2 kaapelivarusteiden osittaispurkaustason suurimmaksi hyväksytyksi tasoksi on määritelty 10 pC 1,73 -kertaisella vaihejännitteellä, minkä vuoksi mitään mittausjärjestelmän herkkyystason ylittäviä purkauksia ei yleensä sallita kaapeleissa tai niiden varusteissa. Standardissa mainitaan myös, että mikä tahansa osittaispurkaus *vo*
olla eristeille haitallinen.

Purkauksia havainnoidaan myös akustisesti, optisesti, kemiallisesti ja sähkömagneettisesti [6, s. 17]. Akustista havainnointia voidaan tarvita, jos tavallisesta PD-mittauksesta halutaan poissulkea esimerkiksi korona tai eristeen pinnalla tapahtuvat pintapurkaukset. Jos purkauksia havaitaan yllättävän alhaisilla jännitteillä, voidaan ultraäänipeilillä kuunnella jännitteisen eristysrakenteen pinnalta, syntyykö siinä pintapurkauksia tai koronaa. Laboratoriomittauksissa voidaan nostaa esimerkiksi kaapeliliittimessä syttyvän koronan toteamisen jälkeen sen syttymisjännitettä sijoittamalla liitin pyöreämuotoisen johtavan kappaleen sisälle. Tällä tavoin saadaan varmistettua, että mittalaitteelle tuleva signaali kuvaa ainoastaan eristysrakenteen sisällä syntyviä haitallisia osittaispurkauksia. Optinen havainnointi perustuu esimerkiksi koronan aiheuttamaan ultraviolettisäteilyyn, jota voidaan tallentaa erikoisrakenteisella kameralla. [10, s. 31] Sähkömagneettisesti osittaispurkauksia havainnoidaan antennien avulla ja kemiallisesti analysoimalla eristysmateriaalissa osittaispurkausten seurauksena syntyviä reaktiotuotteita tai materiaalin kemiallisia muutoksia esimerkiksi muuntajaöljyä tutkittaessa. [23, s. 5]

Jos sisäinen osittaispurkaus halutaan paikantaa, se tehdään maakaapeleiden tapauksessa sähköisesti. Osittaispurkausten sähköinen paikantaminen perustuu kulkuaaltojen liikkumiseen ja heijastumiseen kaapelin sisällä. Kun purkaus tapahtuu, purkaukshaudasta lähtee liikkeelle kulkuaallot kohti molempia kaapelin päitä. Kulkuaalto heijastuu kaapelin avoimesta päästä ja aaltojen kulkuman matkan ja siihen käytetyn ajan perusteella voidaan laskea vikakohdan etäisyys mittauspisteestä. [10, s. 31]

4. KAAPELIT JA KAAPELIPÄÄTTEET

Muovieristeisiä kaapeleita on tällä hetkellä saatavilla ainakin siirtojännitteelle 525 kV asti ja jännitealueelle 36 – 245 kV valmistetaan vain muovieristeisiä kaapeleita [2, s. 150]. Keskijänniteverkon kaapelit ovat nykyään pääsääntöisesti muovieristeisiä, vaikka vanhempia paperieristeisiä kaapeleita on vielä käytössä. Keskijännitettä ei ole määritelty tarkasti, mutta tyypillisesti puhutaan keskijännitekaapeleista, kun pääjännite vaihtelee 6 kV ja 36 kV välillä. [4, s. 16] Suomessa vaihtojännitekaapeleita on käytössä 110 kV jännitteelle asti [24, s. 303].

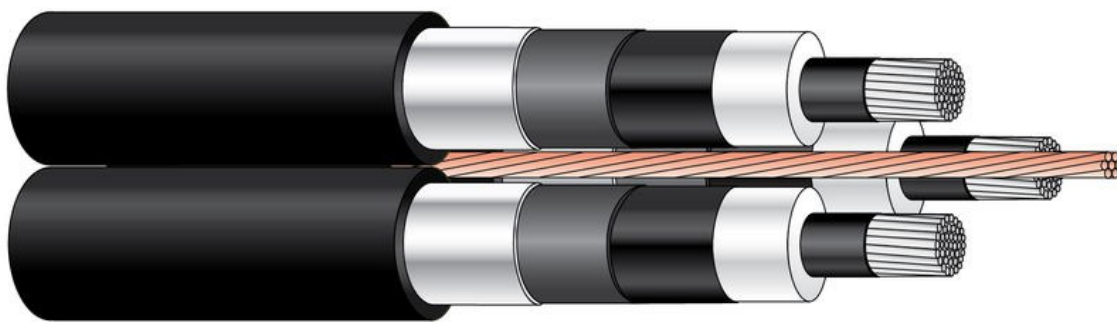
Vaikka kaapelit ovat ilmajohtoja kalliimpia, ilmajohtoja kaapeloidaan kasvavalla vauhdilla käyttökeskeytysten ja keskeytyskustannusten minimoimiseksi. Kaapeliverkon vikaantuminen on ilmajohtoverkkoa vakavampaa, koska varsinkin kaapelin keskellä olevan vian vuoksi kaapeli joudutaan kaivamaan ylös maasta korjauksen ajaksi.

Kaapelipäätteen tai -jatkoksen asentaminen kosteaan ympäristöön tuo lisähaasteita ympäristöolosuhteilta suojaamiselle. Vesi on yksi suurimpia maakaapelitarvikkeissa olevien vikojen aiheuttajia. Kaapelipääte tai –jatkos voi vikaantua nopeastikin, jos se on asennettu tai suunniteltu huonosti. [25, s. 4] Jos kaapelissa tai kaapelipäätteessä syntyy jatkuvaa osittaispurkausaktiiviteettia käyttöjännitteellä, kaapeli todennäköisesti vikaantuu tulevaisuudessa vakavasti. [26, s. 1]

4.1 Kaapelin rakenne

Sähkön siirtoon käytettävien kaapeleiden rakenne on päästä katsottuna pyörähdyssymmetrinen ja kerroksittainen. Sisimpänä on sähköä kuljettava johdin, joka voi olla alumiinia tai kuparia. Alumiini on kuparia kevyempää ja halvempaa, mutta kuparia käytetään joissakin tapauksissa, jos johtimen johtavuuden halutaan olevan alumiinin johtavuutta parempi ja johtimen poikkipinta-alaa ei haluta kasvattaa. Itse johdin muodostuu useammasta osajohtimesta ja on tehty poikkileikkaukseltaan pyöreäksi sähkökentän jakauman optimoimiseksi ja osittaispurkausten esiintymismahdollisuuden minimoimiseksi. [4, s. 16]

Johtimen ja uloimman kuoren välissä on puolijohtavia kerroksia, eristettä, tukirakenteita ja niin kutsuttu konsentrisen nollajohdin. Nollajohdin voi olla alumiinia tai kuparia. Tässä työssä tutkittava kaapeli on valmistajan Prysmian Cables AHXAMK-W –tyypin kaapeli. Kaapelin nimellinen pääjännite on 20 kV ja johtimen pinta-ala 95 mm².



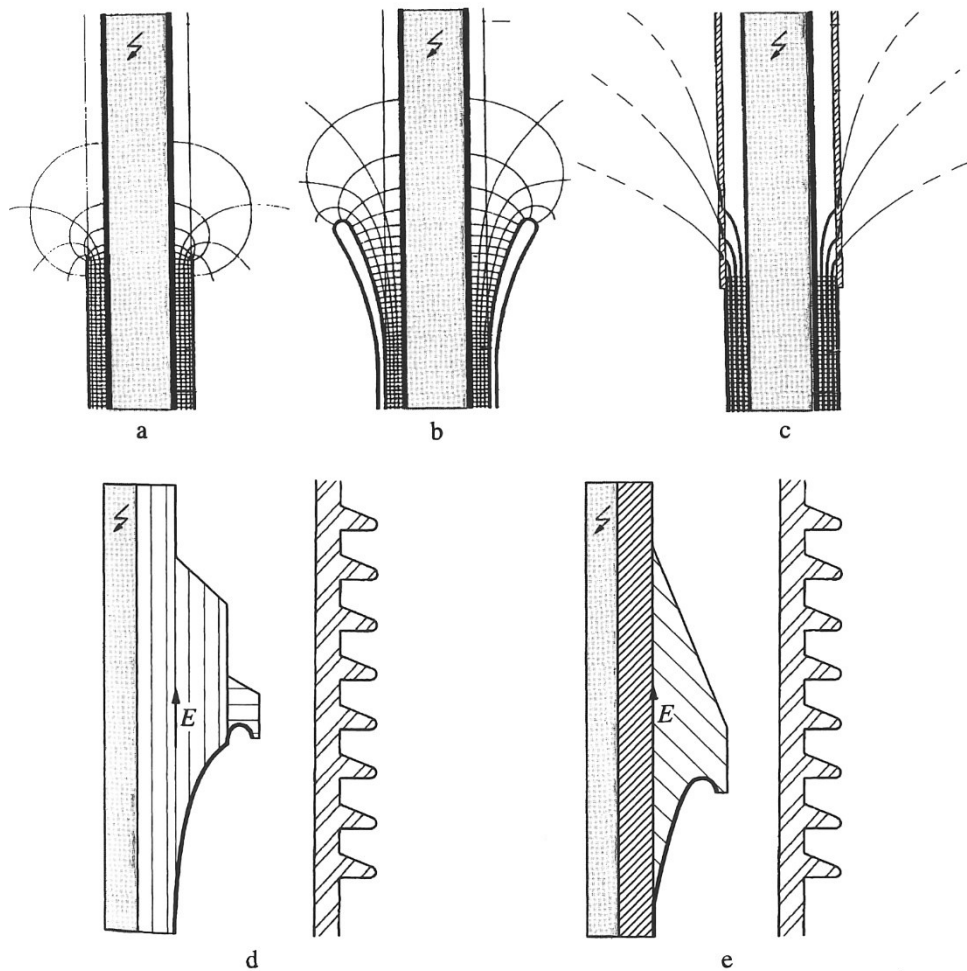
Kuva 4.1 Työssä käytettävän keskijännitekaapelin havainnekuva. [27]

Kuvassa 4.1 on esitettyä työssä käytettävän kolmivaiheisen kaapelin rakenne. Kaapeli on työtä varten kierretty auki ja työssä on käsitelty pelkästään yhtä vaihetta. Johtimen pinnalla on puolijohtava kerros, johdinsuoja, joka tasaa johtimen osajohdinten välisiä kuoppia ja estää ilmataskujen muodostumista johtimen ja eristeen väliin. Kerros tuo johtimessa olevan sähköisen potentiaalineristeen sisäpinnalle ja pitää sähkökentän jakauman tasaisena eristettä vasten ja on osittaispurkausten estämisen vuoksi välttämätön osa keskijännitekaapelia [10, s. 11]. Puolijohtavan kerroksen päällä on kaapelin pääeriste, jonka tarkoitus on eristää vaihejohdin irti konsentrisen nollajohtimen maatasosta. Eriste myös johtaa johtimessa syntyvän lämmön pois johtimen pinnalta. Alumiinisen nollajohtimen ja pääeristeen välissä on puolijohtavaa materiaalia oleva hohtosuoja, jonka tarkoitus on johdinsuojan kanssa yhdessä ympäröidä johtimen aiheuttama sähkökenttä ja muodostaa pääeristykselle mahdollisimman tasainen ulkopinta [28, s. 5]. Hohtosuojan päällä on veden kosketuksesta turpoava ja veden etenemisen kaapelissa pysäyttävä kangaskerros. [4, s. 17] Konsentrinen nollajohdin, eli kosketussuoja ympäröi kaapelin rakennetta ulkokuoren alla ja estää johtimen aiheuttaman sähkökentän pääsyn kaapelin ulkopuolelle. Nollajohdin toimii myös paluutienä nollavirroille ja maasulkuvirroille, sekä suojaa ihmisiä ja laitteita suurjännitteiltä. Kosketussuojan päällä oleva ulkovaippa suojaa kaapelia kemiallisesti ja mekaanisesti, sekä estää veden pääsemisen kaapelin sisälle [28, s. 5].

4.2 Kaapelipääte

Kaapelipääteen tarkoitus on päättää kaapeli, eli tehdä se galvaanisesti kytkettäväksi toimilaitteisiin ja ohjata kaapelin päähän muodostuva sähkökenttä taipumaan pehmeästi pitkittäisestä poikittaiseksi, jotta kaapelipääte kestää sille standardeissa määritellyt sähköiset rasitukset. Kaapelipääteessä konsentrinen nollajohdin ja hohtosuoja päättyvät useita kymmeniä senttimetrejä ennen vaihejohtimen päättymistä. Koska hohtosuoja päättyy ennen vaihejohdinta ja kaapelin lieriösymmetrinen rakenne rikkoutuu, sähkökenttä pyrkii taipumaan hohtosuojan päättymiskohdassa jyrkästi. Sähkökentän taipumista pyritään ohjaamaan esimerkiksi kuvan 4.2 mukaisilla ohjausrakenteilla, jotta

pääteessä välttyttäisiin voimakkaalta sähkökentän tihentymältä ja sen seurauksena helposti esiintyviltä osittaispurkauksilta.



Kuva 4.2 Kaapelipäätteen jännitteenjakaumia ja ohjausrakenteita. a) Jakauma, kun ohjausta ei käytetä. b) Jakauma elektrodimuodolla ohjatussa pääteessä. c) Jakauma käytettäessä permittiviteettien eroon perustuvaa ohjausta. d) ja e) Ohjaukseen käytettäviä keilarakenteita, joissa lisäeristys on osittain päällystetty johtavalla materiaalilla (vahvennettu viiva). [2, s. 155]

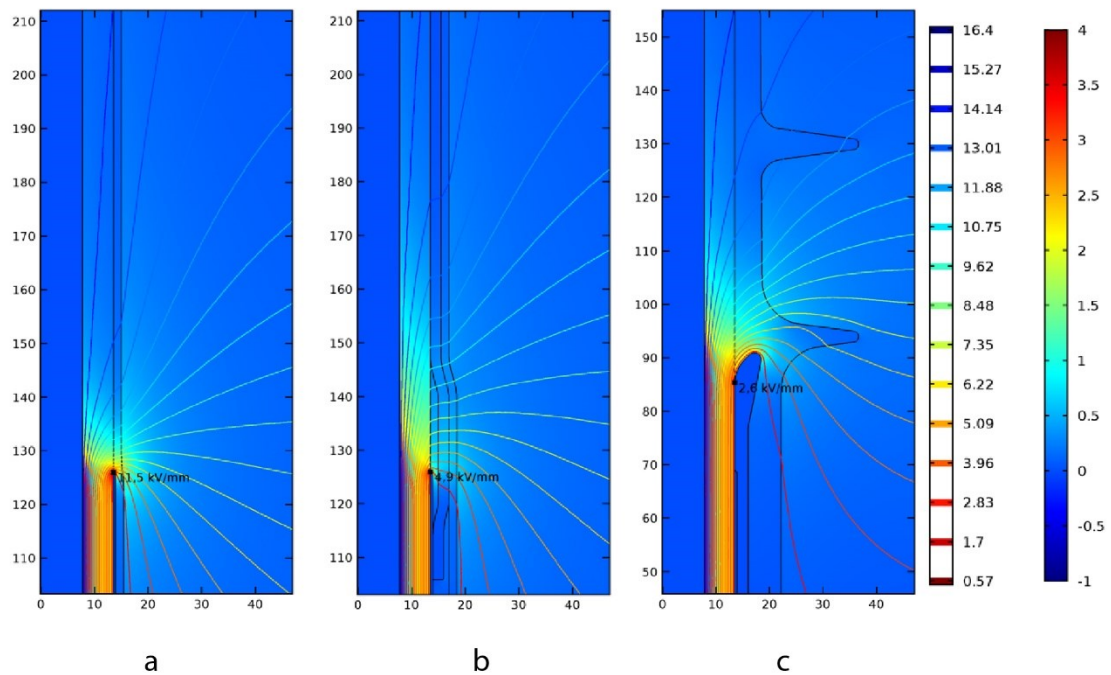
Kaapelipäätteen muita tehtäviä on pitää kosteus poissa kaapelista, suojata kaapelin päätä mekaanisesti ja kestää samat sähköiset rasitukset, kuin itse kaapelikin. [24, s. 327] Pääteessä ei siis saa esiintyä lainkaan sisäisiä osittaispurkauksia. Joissakin tapauksissa kaapelipäätteen pinnalla sallitaan jonkin verran pintapurkauksia, mutta päätteen materiaalin on kestävä niiden aiheuttama rasitus.

Kaapelipäätteitä on olemassa kahta päätyyppiä. Lämpökutistepäätteet ja kylmäkutistepäätteet. Kylmäkutistepäätteet ovat syrjäyttämässä lämpökutistepäätteet asennuksen helppouden ja niiden toimintavarmuuden takia. Kylmäkutistepäätteiden asentaminen on mahdollista suorittaa ilman kaasuliekkä, ne ovat nopeampia asentaa ja

myös asennusvirheiden mahdollisuus on vähäisempi. [29, s. 1] Sähkökentän ohjaus toteutetaan kylmäkutistepääteessä lisäämällä kaapelieristyksen päälle keilamainen lisäeristys joka pehmentää sähkökentän taipumista hohtosuojan reunalla. Lämpökutistepääteessä kentänohjaus rakennetaan hohtosuojan päättymiskohtaan kaapelieristeen reunalle kentänohjausmassan ja kentänohjausletkun avulla päätettä asennettaessa. Kentänohjaus pehmentää sähkökentän taipumista hohtosuojan reunalla, sekä tasaa ulkoisen eristyksen kokemaa kentänjakaumaa ja vähentää liukupurkausten syntymistodennäköisyyttä. [2, s. 155], [29, s. 5]

Työssä käytettävissä Enston kaapelipääteissä kentänohjaus on toteutettu kahdella eri tavalla. Lämpökutistepääteessä kentänohjaus toteutetaan erillisellä suuren permittiviteetin omaavalla kentänohjausmassalla ja puolijohtavalla kutistemuovilieriöllä. Kentänohjausmassa kiedotaan hohtosuojan päättymiskohtaan pääeristeen ja hohtosuojan päälle. Kentänohjausletku kutistetaan kentänohjausmassan päälle, josta se jatkuu pääeristeen päälle. Sekä kentänohjausmassa, että kentänohjausletku ovat suuripermittiviteettistä materiaalia, jolloin ne pakottavat sähkökentän kulkemaan jonkin matkaa pääeristeen suuntaisesti ennen taipumistaan eristeestä ja vaihejohtimesta pois päin kuten kuvissa 4.2c ja 4.3b. Kentänohjausta käytettäessä vältetään sähkökentän terävältä suunnan muutokselta hohtosuojan reunalla ja siitä aiheutuvista ongelmista. Virheitä asennuksessa voi tulla massan venyttämisessä, kiertämisessä ja sijoittamisessa sekä kentänohjauslieriön sijoittelussa ja kutistamisessa, minkä seurauksena rakenteeseen voi jäädä sähkökentän tihentymiä tai kaasutäytteisiä onteloita.

Työssä käytetyssä kylmäkutistepääteessä kentänohjauskartio on valettu kylmäkutisteen sisälle ja ainoastaan kutisteen sijoittelu oikealle etäisyydelle hohtosuojan reunasta on kriittinen osa kentänohjauksen asentamista. Kylmäkutiste kutistetaan vetämällä sen sisällä sijaitseva muovispiraali pois kutisteen päädyistä ja se myös jatkaa kutistumistaan toisin kuin lämpökutistepääte. Kuvassa 4.3 on esitettyä pääjännitteeltään 20 kV lämpökutiste- ja kylmäkutistepääteiden sähkökenttien jakaumat verrattuna päätteeseen, jossa ei ole kentänohjausta. Sähkökentän voimakkuus on esitetty väreillä. Kuvassa on Ensto Oy:n tekemät simulaatiot. Huomioitavaa on kylmäkutistepäätteen valmiiksi valetun kentänohjauskeilan parempi kentänohjauksen toteutus. Sähkökenttä taipuu lämpökutistepäätteeseen nähden paljon pehmeämmin pois hohtosuojan reunalta ja suurin sähkökentän voimakkuus on vain 2.6 kV/mm verrattuna lämpökutistepäätteen 4.9 kV/mm.



Kuva 4.3 Sähkökentän jakaumat vasemmalta lukien: ei kentänohjausta, kentänohjaus lämpökutistepääteessä, kentänohjaus kylmäkutistepääteessä. Muokattu lähteestä [30, s. 2]

Molempien päätteiden asennuksessa on useita työvaiheita, joissa asentajan olisi hyvä tuntea oikeat työskentelytavat ja hieman suurjännitteisiin liittyvien sähköisten ilmiöiden teoriaa. Osa asennusohjeiden kohdista voi tuntua turhilta suorittaa ohjeiden mukaisesti oikomatta, jos asentajalle ei ole erikseen selvennetty tarkoitusta tiettyjen työvaiheiden taustalla. Kylmäkutistepääte on nopeampi ja helpompi asentaa kuin lämpökutiste, ja niiden asennuksessa tapahtuu Ensto Oy:n mukaan vähemmän virheitä.

4.3 Kaapelipäätteen asennus ja asennusvirheet

Kaapelipäätteitä asennettaessa tulee noudattaa tarkasti päätteen valmistajan asennusohjetta. Pääte olisi hyvä asentaa puhtaassa ja kuivassa ympäristössä ilman kiirettä. Reaalimaailmassa päätteitä asennetaan kentällä likaisissa ja mahdollisesti kosteissa olosuhteissa tiukassa aikataulussa. Asennusvirheiden vuoksi esimerkiksi Ensto Oy järjestää ilmaista koulutusta päätteiden asentajille. Päätteiden asennusohjeet ovat hyvät, mutta jokainen kohta ohjeista on tärkeä ja pieniä virheitä voi sattua kokeneemmallekin päätteen asentajalle. Tässä työssä esiteltävät lämpö- ja kylmäkutistepäätteiden asennusohjeet koskevat Ensto Oy:n valmistamien päätteiden asentamista alumiinifolioisella kosketussuojalla varustettuun keskijännitekaapeliin lähteiden [31] ja [32] mukaisesti.

Asennusvirheillä voi olla kaapelipääteen kestoialle vakavia seurauksia. Osittaispurkaukset ovat sitä vakavampia, mitä suurempia ja mitä enemmän niitä syttyy. Sille ei ole kuitenkaan yksiselitteistä vastausta, kuinka suuria purkauksia kaapelissa tai kaapelipääteessä saa syntyä ennen kuin kaapelin tai pääteen korjaaminen on välttämätöntä. Laboratoriotesteissä kaapelit koetetaan standardin IEC 60502-2 mukaisesti vikavapaiksi niin, että osittaispurkaustaso on vähintäänkin alle 10 pC. Kaapeli ja pääte siis hylätään, jos purkauksia syntyy yli 10 pC tasolla.

Aiemmin tehdyissä opinnäytetöissä asennusvirheistä on tutkittu muun muassa pääeristeen sorvauksessa tehtyä sorvauksen epätasaisuutta, hohtosuojan sorvauksessa käytettävän pysäytyslevyn käyttämättä jättämisen seurauksena jäänyttä terävää kulmaa hohtosuojan reunassa, hohtosuojan jättämistä pääeristeen pinnalle ja märkää kentänohjausmassaa [1]. Myös esimerkiksi löysäksi jätettyjen eristinlaippojen vaikutuksia pintapurkauksiin on tutkittu [6].

4.3.1 Lämpökutistepääte

Ennen lämpö- tai kylmäkutistepääteen asennusta on varmistettava, että paketissa on kaikki tarvittavat tarvikkeet. Asentajan on myös huolehdittava, että käytetyt työkalut ovat asianmukaisia ja että niitä käytetään oikein. Lämpökutistepäätettä käsittelevä teksti keskittyy eristysrakenteen asentamiseen [31] ja ei siten ole muilta osin täydellinen.

Lämpökutistepääteen asennus alkaa kaapelin katkaisusta oikean mittaiseksi. Katkaisun jälkeen kaapelin ulkovaipasta mitataan 370 mm pituus kaapelin päästä lähtien ja merkitään ulkovaipan kuorintakohta. Tämän jälkeen ulkovaippaa lämmitetään kaasuliekillä useita minuutteja tasaisesti joka puolelta, kunnes se on pehmennyt sopivasti. Kun sopiva lämpötila on saavutettu, kuoritaan ulkovaippa kuorintanarulla pois. Kuorimisvaiheessa on mahdollista taivuttaa lämmitettyä kaapelia liikaa ulkovaipan katkaisukohdasta jolloin kosketussuojaan voi tulla ryppyjä ja myöhemmin asennettava nollajohdin saa huonon galvaanisen yhteyden kosketussuojaan. Kuorimisen jälkeen kosketussuojasta poistetaan liimajäämiä hiontanauhalla hiomatta kuitenkaan kosketussuojaa puhki. Jos alumiiniseen, ohueen kerrokseen on jäänyt ryppy liiallisesta taivutuksesta, se on hyvin helposti vahingossa hiottavissa puhki. Hiomisessa täytyy noudattaa varovaisuutta, sillä kosketussuoja on hyvin ohut.

Kosketussuojan hiomisen jälkeen sen päälle 40 mm päähän ulkovaipasta kierretään vakiovoimajousi ja loput kosketussuojasta leikataan irti vakiovoimajousta vasten. Tämän jälkeen kosketussuojan alla oleva veden läsnäolosta turpoava kangaskerros suikaloidaan ja leikataan myös poikki vakiovoimajouksen reunaa vasten. Ennen hohtosuojan kuorimista kaapelin on hyvä antaa jäähtyä muutama tunti, jotta muovit ehtivät kovettua tarpeeksi helppoa kuorintaa varten. Hohtosuoja kuoritaan siten, että sitä

jää 40 mm verran pääeristeen päälle kosketussuojan päättymisen jälkeen. Hohtosuojan sorvauksessa on mahdollista tehdä useita erilaisia virheitä ja vikoja kaapelipääteeseen. Sorvaus tulee suorittaa terävällä terällä varustetulla sorvauslaitteella, koska tylsynyt terä tekee pääeristeeseen uria. Sorvaus tulee päättää pysäytyslaippaa vasten löysäämällä hieman terän puristusta kaapeliin ennen päatekohdan saavuttamista. Sorvauksen päättämisessä voi hohtosuojan ja pääeristeen reunalle jäädä ilmataskullinen kieleke, jos sorvausta ei päätetä oikein. Myös sorvauslaitetta pois vedettäessä täytyy olla erityisen varovainen, jotta terä ei tee viiltoja pääeristeeseen.

Sorvauksen jälkeen pääeriste hiotaan hiomanauhalla. Hiomanauhalla ei saa hioa yhtään hohtosuojan päältä, vaan pääeristeen ja hohtosuojan reunalla on oltava erityisen varovainen. Jos hohtosuojan päältä hiotaan, siitä joutuu hyvin helposti joko ilmateitse tai hiomanauhan mukana puolijohtavaa pölyä pääeristeen pinnalle ja osittaispurkausten riski kasvaa. Hionnan jälkeen pääeristettä poistetaan erillisellä sorvaustyökalulla kaapelin päästä 38 mm ja kaapelikengä asennetaan johtimen päähän. Tässä vaiheessa kaapelikengän vakiovääntömomentista katkeavan pultin mahdolliset terävät reunat pehmennetään pyöreäpäisellä vasaralla ja pultin reikä täytetään massalla. Kaapelikengään ei saa jäädä teräviä kärkiä osittaispurkausriskin takia. Kaapelikengän asentamisen jälkeen pääeriste puhdistetaan alkoholia sisältävällä puhdistusliinalla. Tässäkin vaiheessa ohjeissa erikseen varoitetaan hohtosuojan päältä pääeristeen päälle mahdollisesti siirtyvistä puolijohtavista hiukkasista. Puhdistus tulee suorittaa kaapelikengän päästä hohtosuojaan päin niin, että hohtosuojan päällä käynyttä puhdistusliinan osaa ei enää käytetä pääeristeen päällä.

Puhdistuksen jälkeen päätteeseen tehdään sähkökentän ohjaus. Kentänohjausnauhaa kiedotaan kaksi kerrosta hohtosuojan katkaisukohtaan 10 mm hohtosuojan ja 20 mm pääeristeyksen päälle. Nauhan kietominen tulee aloittaa hohtosuojan päältä ja nauha venytetään puoleen alkuperäisestä leveydestään ja kiedotaan 50 % limityksellä. Kentänohjausnauhan kietomisen jälkeen asennetaan kentänohjausletku alkaen 10 mm hohtosuojan päältä kentänohjausnauhan ja pääeristeen päälle. Kentänohjausletku kutistetaan kaasuliekillä alkaen kentänohjausnauhan päältä ja edeten kaapelikengää kohti. Kentänohjausnauhan kietominen ja kentänohjausletkun kutistaminen on mahdollista tehdä virheellisesti siten, että joko massaan jää ilmakuplia tai kentänohjausletku kutistetaan väärästä päästä tai epätasaisesti niin, että ilmakuplia jää letkun ja pääeristeen väliin. Kuvassa 4.4 on lämpökutistepääte, jossa kentänohjaus on asennettu ohjeiden mukaan.



Kuva 4.4 Ehjä, keskeneräinen lämpökutistepääte.

Kentänohjauksen asentamisen jälkeen tiivistysmassaa kiedotaan ulkovaipan reunan päälle ja nollajohdin asennetaan siten että asennuksesta tulee vesitiivis. Nollajohtimen asentamisen jälkeen kiedotaan puolijohtavaa nauhaa vakiovoimajousen ja kosketussuojan näkyvän osan päälle tasoittamaan teräviä reunoja.

Kuparipunoksen asentamisen jälkeen ulkovaipan ja kuparipunoksen välinen rako täytetään tiivistysmassalla kuten myös kaapelikengän ja pääeristeen välinen rako. Tiivistysmassaa kiedotaan lisäksi myös kaapelikengän holkkiosan ja pääeristeen päälle, sekä kentänohjausletkun ja pääeristeen rajapinnalle niin, että kentänohjausletkun päässä oleva jyrkkä kulma pehmenee. Tiivistysmassan kiedonnassa on periaatteessa mahdollista tehdä asennusvirhe kietomalla massa huolimattomasti niin, että sen sisälle jää ilmakuplia joissa voi syttyä osittaispurkauksia. Uloin kerros itse kaapelipääteessä on pintavirran kestävä letku, joka asetetaan koko päätteen päälle ja kutistetaan kaasuliekillä aloittaen kutistaminen ulkovaipan päästä ja edeten kohti kaapelikengää. Myös pintavirran kestävä letkun kutistaminen täytyy tehdä tasaisesti joka puolelta niin, että letkun alle ei jää ilmaa. Kuvassa 4.5 on valmis lämpökutistepääte, jossa on myös laipat asennettuna pintavirran kestävä letkun päälle.



Kuva 4.5 Valmis lämpökutistepääte ulkoasennukseen tarvittavat laipat asennettuna.

Kutistaminen täytyy tehdä laippojenkin kohdalla huolella, sillä epätasaisesti tai riittämättömästi kutistetun laipan ja päätteen välissä voi muutoin syntyä osittaispurkauksia.

4.3.2 Kylmäkutistepääte

Ensto Oy:n kylmäkutistepäätteen asennus eroaa joiltakin osin lämpökutistepäätteen asennuksesta. Ulkovaippa kuoritaan vain 335 mm matkalta ja kosketussuojaa hiotaan ulkovaipan päästä vain 25 mm. Kosketussuoja ja sen alla oleva kangaskerros kuoritaan samaan tapaan kuin lämpökutistepäätteessä. Myös hohtosuojan sorvaus ja pääeristeen hionta suoritetaan samalla tavalla. Vesieristys tehdään hieman erilaisella tiivistysmassalla, mutta kuparipunos asennetaan samoin kuin lämpökutisteessa.

Suurin ero kylmäkutistepäätteellä lämpökutistepäätteeseen verrattuna on kentänohjauksen asennus. Ulkovaipan, vesieristuksen, vakiovoimajousen ja hohtosuojan päälle kiedotaan puolijohtavaa teippiä niin, että hohtosuojusta 20 mm jää näkyviin pääeristeen puolelle. Tämän jälkeen asennetaan kaapelikengä, kuten

lämpökutistepääteessä, mutta kuorien vain 33 mm pääeristettä vaihejohtimen näkyvästä päästä. Pääeristys puhdistetaan, kaapelikengästä poistetaan terävät reunat ja kolot täytetään massalla. Kaapelikengän päälle kiedotaan pvc-teippiä niin, että massat jäävät teipin alle eivätkä liiku pois paikaltaan kylmäkutistetta asennettaessa.

Ennen kylmäkutistepäätteen kentänohjauksen ja ulkovaipan asennusta pääeriste voidellaan silikonirasvalla, mikä helpottaa kylmäkutisteen asettumista paikalleen. Kylmäkutiste asetetaan päätteen päälle alkaen 20 mm hohtosuojan reunasta siitä kohdasta, mihin puolijohtava teippi loppuu. Kylmäkutisteen sisältä vedetään spiraalina pois muovinen sisäholkki, joka estää kutistumisen ennen asennusta. Pääte kutistuu heti kun spiraali vedetään pois. Lopuksi kutisteen päältä käännetään kaksinkerroin taitettu reuna vakiovoimajousen yli ulkovaipan päälle. Ryömimismatkaa pidentävät laipat ovat jo valmiiksi valettuna kylmäkutisteeseen. Kuvassa 4.6 on valmis kylmäkutistepääte.



Kuva 4.6 Valmis kylmäkutistepääte. Laipat ja kentänohjaus ovat valettuna kylmäkutisteeseen.

Kylmäkutistepäätteen asennuksessa asennusvirheitä voi sattua samoissa työvaiheissa, kuin lämpökutistepääteessä, mutta kentänohjausmassan asennus on tehty kutistamisen suhteen helpoksi ja vähemmän virhealttiiksi. Muovispiraalin poisvedossa kylmäkutisteen sisältä voi kuitenkin tapahtua virhe ja spiraali voi jäädä jumiin. Jos spiraalia ei saada kylmäkutisteen sisältä kohtuullisesti pois, kutiste voidaan joutua leikkaamaan auki ja asentamaan uusi. Kylmäkutisteen leikkaamisessa on oltava erittäin tarkkana, ettei päätteen muut osat vahingoitu leikkaamisen seurauksena. Asennusohjeissa kehoitetaan pyörittämään spiraalia kaapelin ympäri samalla kun sitä vedetään ulos, jotta se liikkuu kevyesti. Kylmäkutistepääte on kokonaisuudessaan helpompi ja vaivattomampi asentaa, kuin lämpökutistepääte. Molempien päätteiden asennuksessa on kuitenkin noudatettava oikeita työtapoja ja päätteen asennusohjetta riittävän hyvän lopputuloksen aikaansaamiseksi.

5. KOKEELLISET LABORATORIOMITTAUKSET

Osittaispurkausmittauksia tehdään pääasiassa kaapelivalmistajien laboratorioissa ja erillisissä testauslaboratorioissa, kuten Tampereen teknillisen yliopiston suurjännitelaboratoriossa. Joskus mittauksia tehdään myös käyttöpaikalla. Mittaukset jaetaan käytönaikaisiin, eli niin sanottuihin 'online'-mittauksiin ja käyttökeskeytyksen vaativiin 'offline' -mittauksiin. Pääasiassa osittaispurkausmittaukset ovat offline-mittauksia, jotka vaativat erillisen jännitelähteen ja mittauskytkennät [33, s. 1]. Online-mittaus voidaan tehdä käyttöpaikalla jännitteellisenä, mutta käyttökeskeytyksen vaativa mittaus tehdään, kun koestettava laite on jännitteettömänä ja verkosta erotettuna.

Keskijännitekaapeleita mitataan käyttökeskeytyksen aikana yleensä *VLF*-tekniikalla ('*Very Low Frequency*') tai *DAC*-tekniikalla. *DAC*-tekniikkaa ('*Damped AC*') kutsutaan myös vaimenevan vaihtojännitteen mittaukseksi. Mittauksessa kaapelia varataan tasajännitteellä lyhyen ajan, jonka jälkeen jännitesyöttö kytketään irti ja kaapelin rinnalle kytketään induktanssi. Koska kaapeli muodostaa kapasitanssin, kaapelin ja induktanssin muodostama sähköinen piiri alkaa värähdellä. Värähtelyn taajuus on tyypillisesti noin 50-1000 Hz. Kytkentähetken jälkeen mitataan osittaispurkaukset joltakin tietyltä aikajaksolta värähtelyn aikana. *DAC*-tekniikalla on mahdollista mitata myös häviökerroin testijännitteen vaimenemisen perusteella. [10, s. 32]

Kun mittauksia suoritetaan *VLF*-tekniikalla, testijännitteen värähtelytaajuus on yleensä 0,1 Hz ja aaltomuoto on sini- tai kanttiaalto. Koska taajuus on matala, testilaitteistosta saadaan rakennettua pieni ja kevyt verrattuna 50 Hz taajuudella mitattaessa vaadittavaan laitteistoon nähden [34, s. 1]. Jos mittauksia tehtäisiin käyttötaajuudella, mittalaitteiston tulisi tuottaa huomattava määrä loistehoa ja -virtaa. 0,1 Hz taajuudella tehoa tarvitaan vain noin 0,2 % verrattuna 50 Hz taajuudella tehtäviin mittauksiin. *VLF*-mittauksiin erikoistuneella laitteistolla voidaan nykyään tehdä sekä jännitekoe ja osittaispurkaustesti, että häviökertoimen mittaus. [10, s. 33] Seuraavassa käsitellään tässä työssä käytettyä, Tampereen teknillisen yliopiston suurjännitelaboratorion osittaispurkausmittauksiin tarkoitettua laitteistoa, itse mittausten toteutusta ja mittaustuloksia.

5.1 Mittaus- ja koestuslaitteisto

TTY:n suurjännitelaboratoriossa on käytössä Power Diagnostix GmbH:n valmistama ICMsystem osittaispurkausten mittaukseen suunniteltu mittalaitteisto. Se sisältää

kolmikanavaisen mittauksen osittaispurkauksille sekä jännitemittauksen kaikille kolmelle kanavalle. Laitteistolla on mahdollista mitata myös radiotaajuisten häiriöiden *RIV*-mittauksia ('Radio Influence Voltage') ja toteuttaa muun muassa niin kutsuttu 'gating'-funktio, eli ulkoisen signaalin perusteella jättää tiettyjä häiriöitä huomiotta varsinaisesta mittaussignaalista.

Varsinaisen tietokoneeseen liitettävän mittalaitteen lisäksi mittaukseen tarvitaan häiriöiltä suojattu laboratorio, jännitelähde, kytkentäkondensaattori, mittausimpedanssi ja signaalin esivahvistin kullekin kanavalle. TTY:n suurjännitelaboratorio on hyvin suojattu ulkoisilta häiriöiltä. Maadoitus on toteutettu paksulla kuparilevyllä, joka on juotettu reunoiltaan kiinni metallisiin seiniin. Lisäksi koko tila on ympäröity sähköä johtavalla materiaalilla muodostaen Faradayn häkin. Testimittauksissa sopivalla koekappaleella PD-mittauksen pohjakohina on saatu pysymään alle 0,1 pC.

Jännitelähteenä tämän työn mittauksissa toimii Hipotronics'in valmistama 50 kV vaihtojännitemuuntaja ja kytkentäkondensaattorina myös Hipotronics'in valmistama 4 nF kytkentäkondensaattori jonka jännitelähteen puolella on sarjassa 71 mH ja 3,7 Ω kela poistamassa verkon häiriöitä. Mittausimpedanssi ja esivahvistin ovat ICMsystem-laitteistoon yhteensopivat Power Diagnostix CIL5M/V4 μ 0 ja RPA1. Koekappaleessa tapahtuvien osittaispurkausten virtapulssit kulkevat mittausimpedanssin läpi joka muuttaa virtapulssin sitä vastaavaksi jännitesignaaliaksi. Mittausimpedanssi sisältää myös kytkentäkondensaattorin kanssa sarjaan kytkeytyvän kondensaattorin, muodostaen jännitteenjakajan, jolta testijännite ja sen taajuus ovat mitattavissa. Jännitesignaali kulkee suoraan ja osittaispurkaussignaali esivahvistimen kautta ICMsystems-laitteistolle.

Ennen jokaista mittausta mittalaite pitää kalibroida. Kalibrointi tapahtuu erillisellä Tettex-merkkisellä kalibraattorilla KAL 9510. Tämän työn mittaukset on kalibroitu 10 pC purkaustasolle mittalaitevalmistajan ohjeiden mukaan kahden minuutin ajan, pohjakohinan ollessa kaikkien mittausten ajan korkeintaan 1,60 pC. Standardin IEC 60502-2 kriteerin mukaisesti kaapeleiden testauksessa tarvittavan herkkyyden täytyy olla parempi, kuin 10 pC, mikä näissä kokeissa täyttyy. Mittaukset on pyritty tekemään standardin mukaisesti niiltä osin, kuin se on ollut mahdollista. Jotkin kokeet, esimerkiksi tiiveystesti ja osittaispurkausmittaukset säähuoneessa kylmissä ja kuumissa olosuhteissa eivät ole standardinmukaisia vaan niillä on pyritty määrittämään päätteiden käyttäytymistä muissa olosuhteissa.

Käytettävän 50 kV jännitelähteen jännitteensäätö tehdään käsin ohjaamalla relettä, joka ohjaa säätömuuntajaa. Tästä syystä jännitteensäätö ei ole absoluuttisen tarkkaa, vaan esimerkiksi 25 kV kokeissa jännitelukema oli 25,11 kV. Jännitteet saatiin kokeiden kesken säädettyä mittaustarkkuuden rajoissa samoiksi ja tulokset ovat siten vertailukelpoisia. Jännitelähteen jännitemittauksen tarkkuus on noin ± 1 %.

5.2 Testiohjelma ja tutkitut kaapelipäätteiden vikatyypit

Tässä työssä on käytetty Enston valmistamia kylmä- ja lämpökutistepäätteitä. Kylmäkutisteet ovat mallia COTW1.2402L ja lämpökutistepäätteet HOTHW1.2402L. Kylmäkutiste käy kaapeleihin, joiden poikkipinta-ala 10-95 mm² välillä ja lämpökutiste kaapeleihin, joiden poikkipinta-ala on välillä 25-95 mm². Käytetty kaapeli on Prysmian Cables AHXAMK-W –tyypin kaapeli. Kaapelin nimellinen pääjännite on 20 kV ja johtimen pinta-ala 95 mm². Hohtosuojan sorvaukseen käytettiin Ensto ST308-merkkistä terävällä terällä varustettua sorvauslaitetta. Tässä luvussa kerrotaan, kuinka ja minkälaisia vikoja kaapelipäätteisiin tehtiin vikatyypien tutkimista varten.

Aluksi tutkittiin virheettömästi tehtyjen kaapelipäätteiden käyttäytymistä erilaisissa olosuhteissa ja asennustilanteissa. Virheettömiä kaapelipäätteitä koestettiin TTY:n suurjännitelaboratorion säähuoneessa lämpötiloissa -40 °C, +20 °C ja +70 °C. Koe tehtiin, jotta voitiin todeta, että päätteet on asennettu oikein ja niissä ei ole purkauksia silloin, kun ei pitäisikään olla. Lisäksi saatiin tietoa päätteiden ja mahdollisen purkausaktiviteetin käyttäytymisestä erilaisissa lämpötiloissa. Myös päätteiden tiiveyttä testattiin upottamalla päätteet kuumaan veteen 18 tunnin mittaisissa sykleissä ja mittaamalla osittaispurkaukset ja eristysvastus upotusten välissä. Upotuskoe tehtiin, jotta saatiin tietoa päätteiden tiiveydestä ja mahdollisen päätteen sisään päässeeseen veden vaikutuksista osittaispurkauksiin ja eristysvastukseen. Viimeinen virheettömästi asennetuille kaapelipäätteille tehty koe oli taivutuskoe, jossa tutkittiin päätteille mahdollisesti aiheutuvia ongelmia, jos niitä asennetaan -20 °C lämpötilassa ja taivutetaan jyrkästi lopullista asennuspaikkaa kohti. Taivutuksia tehtiin useita ja niiden välissä tehtiin osittaispurkausmittauksia.

Varsinaisiin tarkoituksella viallisiksi asennettuihin päätteisiin vikoja tehtiin useita erilaisia. Päätteiden kentänohjausmassassa asennettiin eräissä päätteissä väärin, koska asentajan on mahdollista tehdä saman tyyppisiä virheitä kentällä. Yhdestä päätteestä kentänohjausmassassa jätettiin kokonaan pois ja kahteen muuhun päätteeseen jätettiin eri kokoiset raot kentänohjausmassan ja hohtosuojan väliin. Myös hohtosuojan sorvauksessa tehtyjä vikoja tutkittiin. Hohtosuoja sorvattiin kuluneella terällä varustetulla sorvauslaitteella, jotta hohtosuoja urautuisi ja urissa syttyisi mahdollisesti osittaispurkauksia. Lisäksi eräissä päätteissä pysäytyslevyä ei käytetty sorvausta lopetettaessa ja hohtosuojan reunaan syntyi siitä johtuen terävä kulma. Eräissä päätteissä hohtosuoja sorvattiin pois niin, että pääeristeen pinnalle jäi pala hohtosuoja. Hohtosuojan huolimattoman sorvauksen lisäksi joistakin päätteistä pääeriste hiottiin huolimattomasti, osittain hohtosuojan päältä. Hohtosuojan päältä hiottaessa saattaa johtavia hiukkasia ja pölyä kulkeutua pääeristeen pinnalle aiheuttaen näin osittaispurkauksia. Kaikki hohtosuojan sorvaukseen ja pääeristeen hiontaan liittyvät viat ovat sellaisia, mitä asentaja voi huolimattomuuttaan tehdä ja jättää kentällä

asennettavaan kaapelipäätteeseen. Lopuksi eniten purkausaktiivisuutta osoittaneet kaapelit vietiin ikäännytykokeeseen TTY:n ulkokoealentalle 18 kV vaihejännitteeseen. Ikäännytykoe oli lyhyt testi purkausten trendien alkuvaiheiden tutkimista varten. Taulukossa 5.1 on esitettyä kaapelipäätteet, viat ja kaapelipäätteille tehtyt kokeet. Kylmäkutistepäätteet on nimetty ja numeroitu alkaen päätteestä C1 ja lämpökutistepäätteet alkaen päätteestä H1. Varsinaiset vialliset päätteet on taulukossa korostettu sinisellä värillä.

Taulukko 5.1 Kaapelipäätteisiin tehtyt viat ja kokeet.

Koekappale	Erilaiset lämpötilat	Kentänohjaus-massa	Sorvaus	Hohtosuoja-jäämä	Puolijohtava pöly	Tiiveyskoe	Taivutus-koe	Ikäännytykoe
H1	x						x	
H2	x						x	
H3		x ei massaa						x
H4		x pieni rako						x
H5		x suuri rako						x
H6			x uria					
H7			x uria ja lovi					x
H8			x uria, hiottu					
H9				x				x
H10				x				
H11					x 20 mm matkalla			
H12					x koko matkalla			x
H13						x		
H14						x		x
C1	x					x	x	x
C2	x					x	x	
C3				x				
C4				x				

Koska kaapeleiden molemmat päät tarvitsevat päätteen mittauksia varten, asennettiin kunkin kaapelin toiseen päähän huolellisesti ja virheettömästi asennettu osittaispurkausvapaa kylmäkutistepääte. Tällöin tiedetään, että mittauksissa näkyneet osittaispurkaukset ovat aiheutuneet vialliseksi asennetussa päätteessä. Purkausvapaat päätteet siis asennettiin ensin neljän metrin mittaisiin kaapeleihin, jotka todettiin osittaispurkausvapaiksi mittaamalla ja myöhemmin katkaistiin kahden metrin mittaisiksi viallisten päätteiden asennusta varten.

5.2.1 Vikavapaiden kylmäkutisteiden asennus ja mittaus

Kaapeleiden ja kylmäkutistepäätteiden haluttiin olevan vikavapaita, jotta ne voidaan katkaista ja asentaa tahallisesti vialliseksi tehtyjä päätteitä katkaistun kaapelin avoimiin päihin vikojen tutkimista varten. Vikavapaiksi rakennetut kaapelipäätteet mitattiin kalibroimalla mittalaite 10 pC purkaustasolle ja nostamalla koestusjännite enimmillään 30 kV suuruiseksi vikavapauden varmistamiseksi. Päivämäärä, mittauksen kellonaika, pohjakohina, verkkojännitteen taajuus, laboratorion lämpötila, ilmankosteus ja ilmanpaine kirjattiin ylös jokaisessa mittauksessa.

Mittaukset toteutettiin nostamalla jännite kalibroinnin jälkeen vaihejännitteen suuruiseksi 12,5 kV tasolle ja odotettiin 5 minuuttia. Jos purkauksia ei syttynyt, nostettiin jännite pääjännitteen suuruiseksi 21,7 kV tasolle ja odotettiin toiset 5 minuuttia. Tämän jälkeen jännite nostettiin standardinmukaiseen kaksi kertaa vaihejännitteeseen 24,0 kV tasolle ja annettiin olla 10 sekuntia. Odotuksen jälkeen jännite laskettiin hitaasti 1,73 kertaiseen vaihejännitteeseen, 20,8 kV tasolle yhdeksi minuutiksi. Päätteiden vikavapauden varmistamiseksi nostettiin jännite vielä minuutiksi 30,0 kV tasolle. Jos pääte läpäisi kaikki testit, eli siinä ei esiintynyt lainkaan pohjakohinatason ylittäviä osittaispurkauksia, se todettiin vikavapaaksi ja sopivaksi käytettäväksi viallisten päätteiden mittauksessa.

Huomioitavaa on, että eräässä koekappaleessa syttyi niin paljon purkauksia, että se jouduttiin hylkäämään. Osassa koekappaleita syttyi myös testijännitteitä alemmilla jännitteillä koronapurkauksia lähellä kaapelikengkää. Purkaukset todettiin akustisesti ultraäänipeilillä ja saatiin sammumaan asettamalla sähkökenttää ohjaava pallon muotoinen alumiinikuori vapaana kelluvan kaapelikengän päälle. Kun kaapelit oli todettu purkauksettomiksi, ne katkaistiin ja avoimiin päihin asennettiin tahallisesti viallisiksi tehtyjä kaapelipäätteitä.

5.2.2 Kentänohjausmassan asennuksen ongelmat

Päätettä asentaessa on mahdollista venyttää ja kohdistaa kentänohjausmassa väärin. Työssä simuloitiin kentänohjausmassan huolimattonta asennusta vaihtelemalla kolmessa eri lämpökutistepäätteessä kentänohjausnauhan asentamistapaa.

Pääte H3 tehtiin niin, että kentänohjausmassa on jätetty päätteen sisältä kokonaan pois. Päätteet H4 ja H5 on tehty kentänohjausmassan kanssa oikeaoppisesti kiedottuna, mutta kentänohjausmassan ja hohtosuojan väliin on jätetty eri suuruiset raot. Päätteessä H4 kentänohjausmassan ja hohtosuojan välinen rako on noin 3 mm ja päätteessä H5 noin 12 mm. Kuvissa 5.1, 5.2 ja 5.3 on esitettyä päätteidensä H3, H4 ja H5 kentänohjausmassan asennuksessa tehdyt viat.



Kuva 5.1 *Lämpökutistepääte H3: kentänohjausmassa jätetty asentamatta.*



Kuva 5.2 *Lämpökutistepääte H4: kentänohjausmassa asennettu väärin. Kentänohjausmassan ja hohtosuojan väliin on jätetty noin 3 mm rako.*



Kuva 5.3 *Lämpökutistepääte H5: kentänohjausmassa asennettu väärin. Kentänohjausmassan ja hohtosuojan väliin on jätetty noin 12 mm rako.*

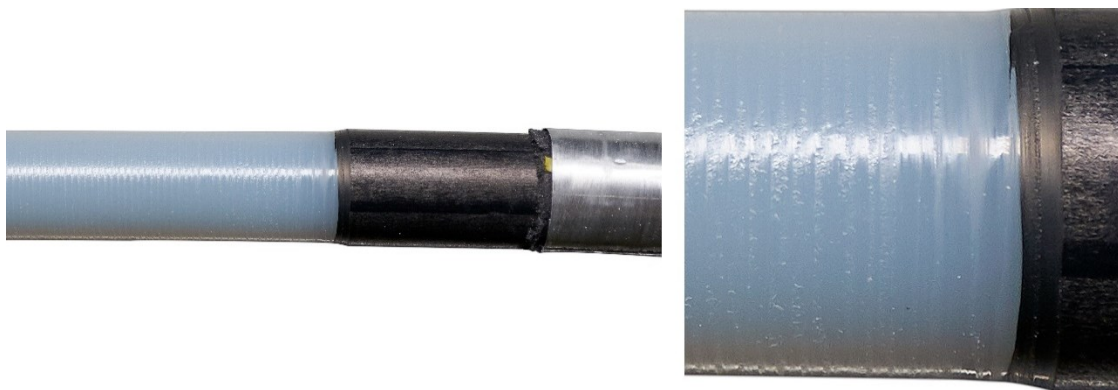
Päätteissä H3, H4 ja H5 kentänohjausletkut kutistettiin kaasuliekillä väärin asennettujen kentänohjausnauhojen päälle oikeaoppisesti. Kentänohjausnauha pehmeni kaasuliekin aiheuttamasta lämmöstä ja leveni jonkin verran kentänohjausletkun kutistumisen aiheuttaman puristumisen vuoksi. Kentänohjausnauhan lopullinen leveys saatiin mitattua kun kokeet olivat ohi ja päätteet oli mahdollista leikata auki. Päätteessä H4 massan lopullinen leveys oli: 22 mm ja päätteessä H5 massa oli 13 mm levyinen. Kummassakaan päätteessä kentänohjausmassa ei ulottunut hohtosuojan reunaan asti vaan päätteessä H4 hohtosuojan ja kentänohjausmassan välinen etäisyys oli lopulta 3 mm ja päätteessä H5 8 mm.

Kentänohjausnauhan puuttuminen tai asentaminen väärin kasvattaa kaapelipäätteiden sisäisten osittaispurkausten syntymisen riskiä. Jo simulointien (kuva 4.3) ja kokemuksen perusteella tiedetään, että sähkökentän voimakkuus ylittää sallitut rajat hohtosuojan reunalla ilman kentänohjausta. Mittauksissa nähdään, miten kentänohjausletku vaikuttaa ja ohjaa sähkökenttää, kun kentänohjausnauha puuttuu tai on asennettu virheellisesti jättäen hohtosuojan ja nauhan väliin rako.

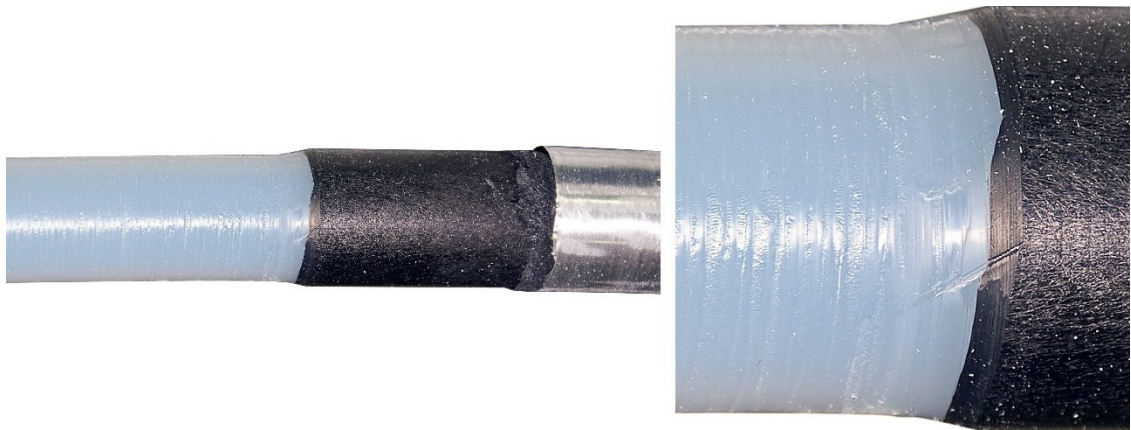
5.2.3 Hohtosuojan sorvauksen ja pääeristeen hionnan ongelmat

Kylmä- ja kuumapäätteen asentamiseen kuuluu hohtosuojan sorvaaminen pois kaapelin pääeristeen pinnalta. Sorvaukseen käytetään siihen tarkoitukseen tehtyä sorvauslaitetta ja sorvaus tehdään käsin pyörittämällä laitetta kaapelin eristyksen päällä. Sorvauksessa voi syntyä virheitä, jos sorvauslaitteen terä on liian kulunut, laitetta käytetään väärin tai sitä käsitellään huolimattomasti. Asentajan tulisi pitää sorvauslaite hyvässä kunnossa ja vaihtaa terä riittävän usein sekä noudattaa huolellisuutta kaapelipäätettä asennettaessa.

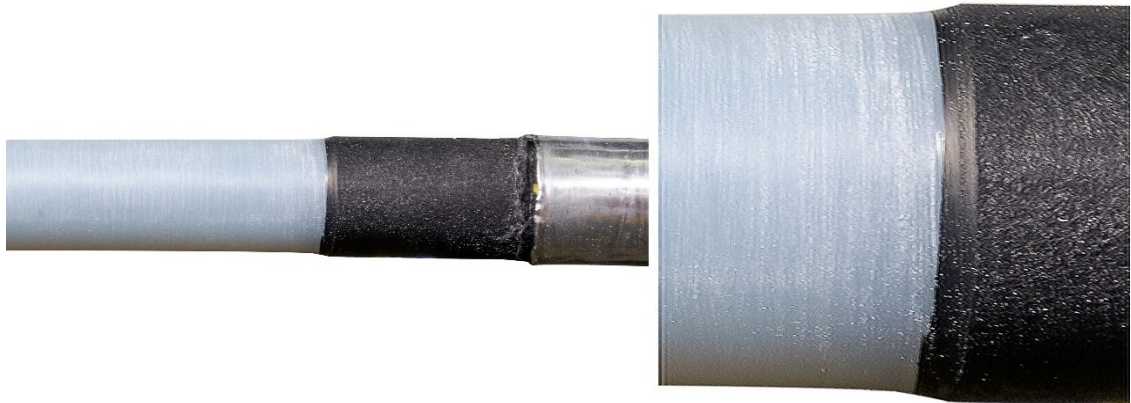
Päätteiden H6, H7 ja H8 osalta tutkittiin kaapelin pääeristeen sorvauksen epätasaisuutta siten, että kaikki päätteet on sorvattu Hivotec SH50 sorvauslaitteella, jossa oli vanha ja kulunut terä. Pääteessä H6 terän kuluminen aiheutti pääeristeeseen silminnähtävät, mutta pehmeäreunaiset urat. Uria syntyi noin 8 kpl/10 mm, mutta ne eivät olleet pinnalta katsottuna syviä. Pääteeseen H7 taas tehtiin hieman epätasaisemmat urat säätämällä leikkauksen syvyyttä ja hohtosuojan reunaan jätettiin myös pieni palkeenkieli sorvausta lopetettaessa. Myös päätteissä H7 ja H8 uria syntyi noin 8 kpl/10 mm. Pääte H8 on tehty samaan tapaan kuin pääte H6, mutta eriste on yritetty hioa mahdollisimman huolellisesti sorvauksen jälkeen, jotta urat ovat pienentyneet. Kuvissa 5.4, 5.5 ja 5.6 on esitettyä huolimattoman ja vanhalla terällä tehdyn sorvauksen aiheuttamat jäljet kaapelin eristyksessä ja hohtosuojassa.



Kuva 5.4 Lämpökutistepääte H6: hohtosuojan epätasainen sorvaus. Eristeeseen on jäänyt uria.



Kuva 5.5 Lämpökutistepäätte H7: hohtosuojan epätasainen sorvaus. Eristeeseen on jäänyt selkeitä uria ja lisäksi hohtosuojan ja eristeen rajalla on sorvauslaitteesta jäänyt pieni lovi.



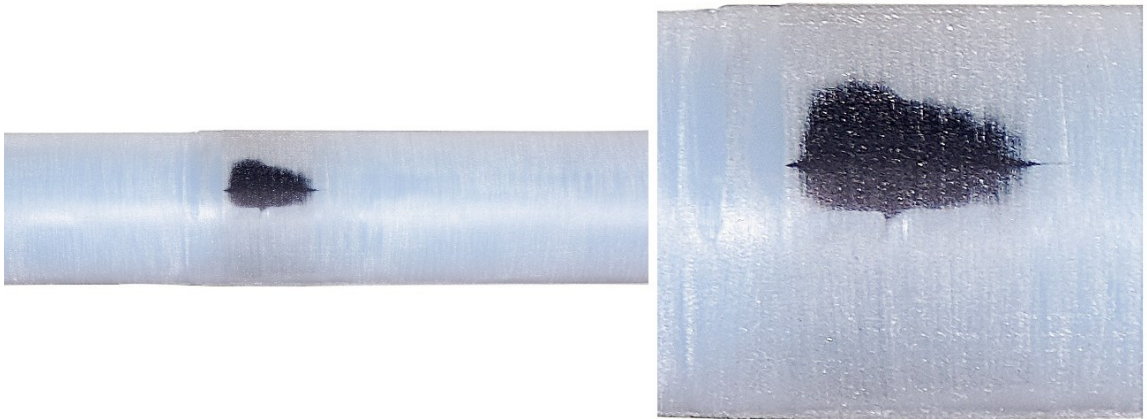
Kuva 5.6 Lämpökutistepäätte H8: hohtosuojan epätasainen sorvaus. Eristeeseen on jäänyt selkeitä uria, mutta urat on yritetty poistaa hiomalla eriste huolellisesti.

Kaapelin pääeristeen huolimaton sorvaus voi aiheuttaa niin syviä uria, että kentänohjausnauha, kentänohjausletku, tiivistysmassa tai päätteen pintamateriaali ei pysty tunkeutumaan uran pohjalle saakka päätettä kutistettaessa ja uraan jää ilmatasku. Osittaispurkausten syntymistodennäköisyys urissa olevissa ilmataskuissa on suuri.

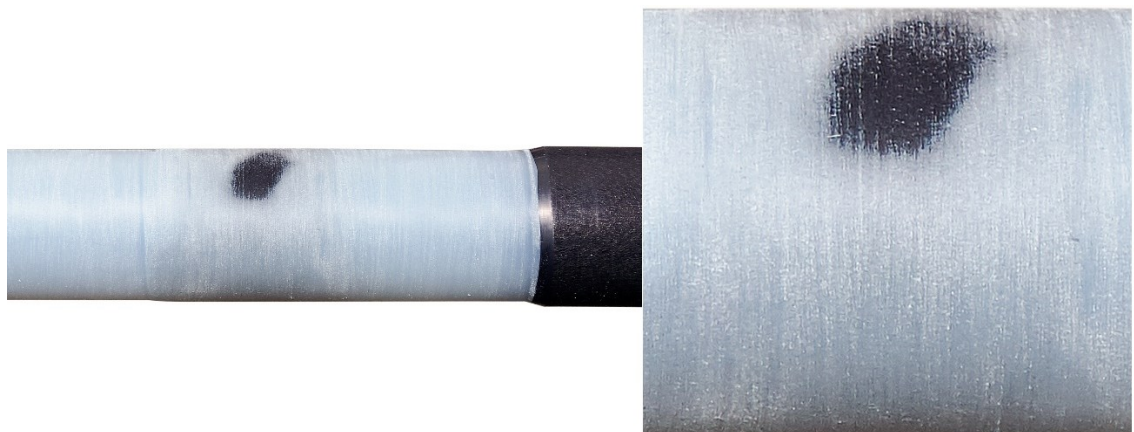
Hohtosuojan sorvaaminen on mahdollista suorittaa myös siten, että kaapelin pääeristeen pinnalle jää paloja hohtosuojasta. Tällöin sorvauslaite ei ole ollut tarpeeksi hyvin kiristettynä kaapelin pinnalle, terä ei ole ollut oikealla syvyydellä ja syötöllä tai kaapeli on ollut jonkin verran taivutettuna sorvauksen aikana, jolloin terä ei saa kunnollista yhteyttä sorvattavaan materiaaliin joltakin puolelta kaapelia. On mahdollista, että asentajalta jää huomaamatta eristeen pinnalle jäänyt hohtosuojan pala, jos päätteen tekijä ei tarkasta sorvausjälkeä huolellisesti joka puolelta kaapelia.

Hohtosuojan epätasaisista sorvausta tutkittiin siten, että sorvauslaitteella tehtiin kahteen päätteeseen, H9 ja H10 vika jättämällä molempiin pala hohtosuojaa pääeristeen

pinnalle. Pääteen H9 tapauksessa hohtosuojajäämä sijaitsee 235 mm päässä hohtosuojan reunasta ja on suuruudeltaan noin 15 x 8 mm. Pääteessä H10 hohtosuojajäämä sijaitsee 80 mm päässä hohtosuojan reunasta ja on suuruudeltaan noin 9 x 12 mm. Hohtosuojajäämä on pääteissä H9 ja H10 eri päässä pääeristettä siksi, että mittauksissa voidaan nähdä purkausaktiviteettien erot kun hohtosuojaa on jäänyt pääteen eri kohtiin, joissa kentänvoimakkuus on erilainen. Hohtosuojan sorvaamisen jälkeen pääeristeiden pinnat hiottiin ohjeiden mukaan, mutta niin, että hohtosuojan kohdalta eristettä hiottiin eri hiomanauhalla johtavien hiukkasten muualle pääeristeeseen kulkeutumisen estämiseksi. Kuvissa 5.7 ja 5.8 on esitettyä hohtosuojajäämät hionnan jälkeen pääteissä H9 ja H10.

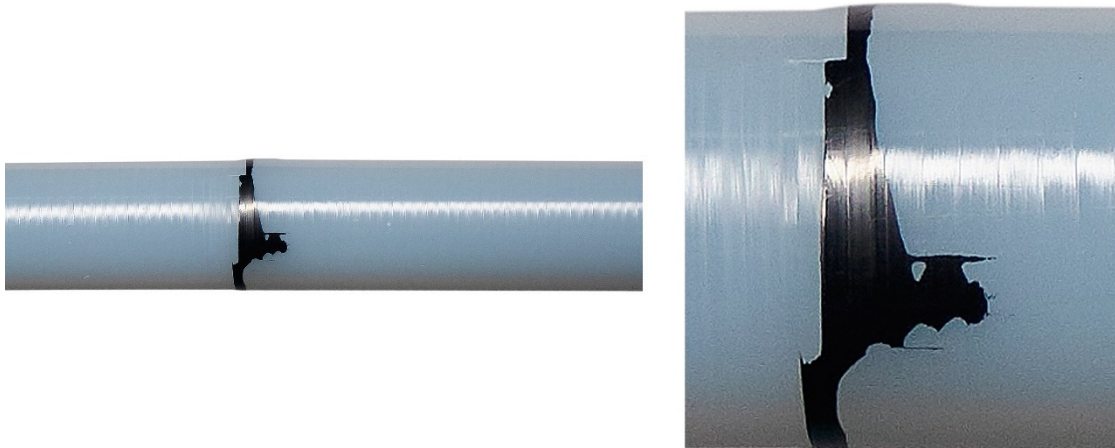


Kuva 5.7 Lämpökutistepääte H9: eristeen sorvauksen ja hionnan seurauksena eristeen pinnalle on jäänyt hieman hohtosuojaa. Hohtosuojajäämä sijaitsee 235 mm päässä hohtosuojan reunasta ja on suuruudeltaan noin 15 x 8 mm. Eristeen hionta on suoritettu eri hiomanauhalla hohtosuojajäämän päältä, jotta koko eristeen matkalle ei joutuisi puolijohtavia hiukkasia hionnan seurauksena.

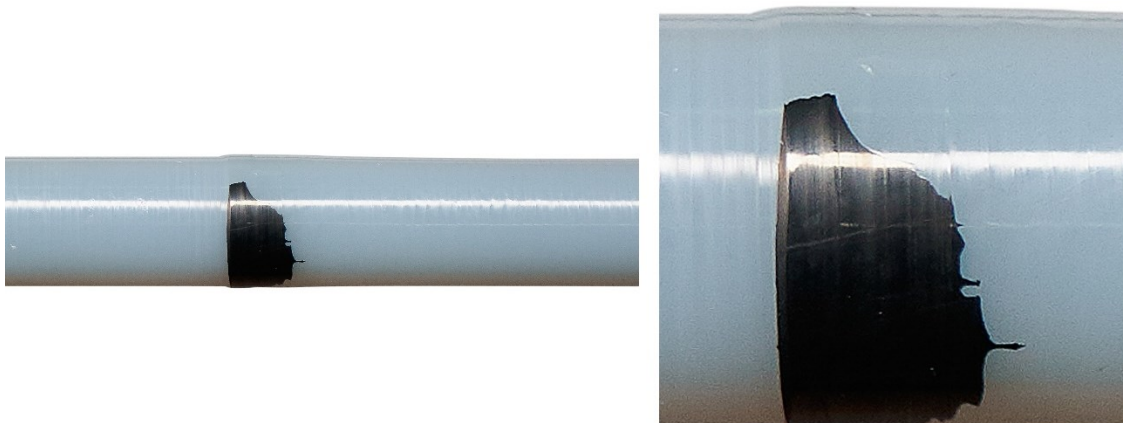


Kuva 5.8 Lämpökutistepääte H10: eristeen sorvauksen ja hionnan seurauksena eristeen pinnalle on jäänyt hieman hohtosuojaa. Hohtosuojajäämä sijaitsee 80 mm päässä hohtosuojan reunasta ja on suuruudeltaan noin 9 x 12 mm. Eristeen hionta on suoritettu eri hiomanauhalla hohtosuojajäämän päältä, jotta koko eristeen matkalle ei joutuisi puolijohtavia hiukkasia hionnan seurauksena.

Hohtosuojan epätasaista sorvausta tutkittiin vertailun vuoksi myös kylmäkutistepäätteissä. Päätteet C3 ja C4 on rakennettu niin, että molempiin on jäänyt sorvauksen johdosta pieni määrä hohtosuojaa. Myös nämä päätteet on hiottu samalla tavalla, kuin päätteet H9 ja H10, mutta kuvat 5.9 ja 5.10 esittävät päätteiden C3 ja C4 hohtosuojajäämiä ennen hiontaa.



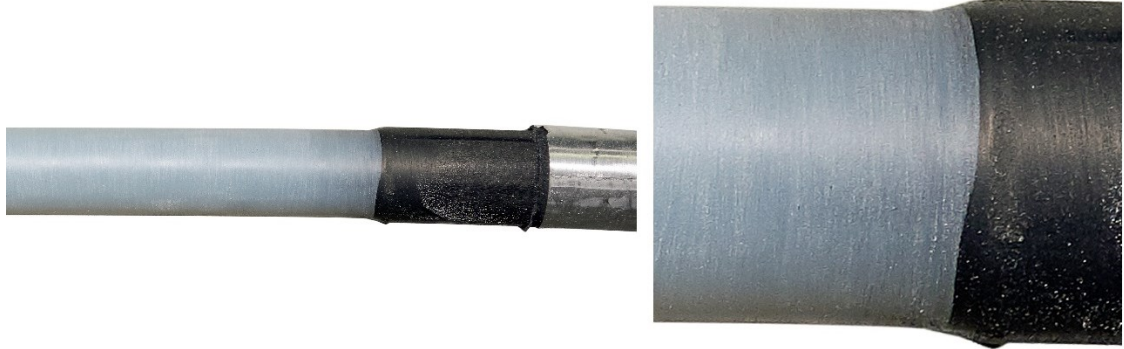
Kuva 5.9 Kylmäkutistepäätte C3: puolijohtavaa kerrosta jäänyt eristeen pinnalle sorvauksen seurauksena. Puolijohtavan kerroksen jäämä sijaitsee kohdassa 138 mm hohtosuojan reunasta ja on noin 10 mm pituinen.



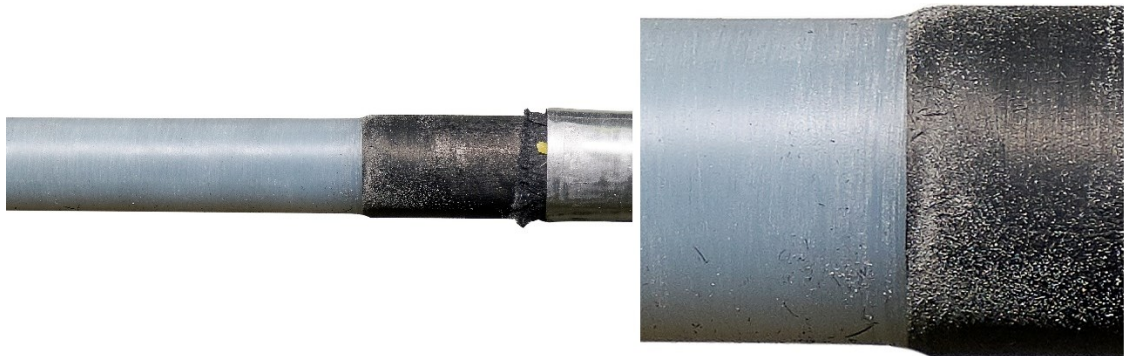
Kuva 5.10 Kylmäkutistepäätte C4: puolijohtavaa kerrosta jäänyt eristeen pinnalle sorvauksen seurauksena. Puolijohtavan kerroksen jäämä sijaitsee kohdassa 146 mm hohtosuojan reunasta ja on noin 11 mm pituinen.

Hohtosuojan sorvauksen jälkeen kaapelin pääeriste hiotaan hiomanauhalla ja hionnan jälkeen se voidaan vielä kiillottaa hiomanauhan selkäpuolella tasaisemman lopputuloksen aikaansaamiseksi. Hiomisessa on varottava koskettamasta hiomanauhalla hohtosuojaa, jotta hohtosuojasta ei irtoa puolijohtavia hiukkasia ja kulkeudu pääeristeen pinnalle. Päätteiden H9 ja H10 hohtosuojan epätasaisen sorvauksen jälkeen asennettiin päätteet H11 ja H12. Päätteet on tehty muuten ohjeiden mukaan, mutta hionta on suoritettu osin hohtosuojan päältä. Samalla hiontanauhalla on sen jälkeen päätteessä

H11 hiottu noin 20 mm matkalta pääeristeen päältä hohtosuojan päästä katsottuna ja päätteessä H12 koko pääeristeen matkalta. Näin ollen hohtosuojasta on kulkeutunut pääeristeen päälle puolijohtavaa pölyä, joka saattaa ainakin joissakin tilanteissa aiheuttaa päätteessä osittaispurkauksia. Päätteiden H11 ja H12 viat ovat esitettynä kuvissa 5.11 ja 5.12.



Kuva 5.11 Lämpökutistepääte H11: eristeen hionta on suoritettu huolimattomasti. Hionnassa on menty hohtosuojan päälle ja siitä on kulkeutunut puolijohtavaa pölyä noin 20 mm matkalle eristeen päälle hohtosuojan reunasta alkaen. Eriste on puhdistettu normaalisti hionnan jälkeen.



Kuva 5.12 Lämpökutistepääte H12: eristeen hionta on suoritettu huolimattomasti. Hionnassa on menty hohtosuojan päälle ja siitä on kulkeutunut puolijohtavaa pölyä koko matkalle eristeen päälle. Eriste on puhdistettu normaalisti hionnan jälkeen.

Kaapelin pääeristeen huolimattoman hionnan on tarkoitus edustaa tilannetta, jossa hiontanauhalla on vahingossa tai tietämättömyyttä kuljettu hohtosuojan päältä ja puolijohtavia hiukkasia on päätynyt joko pienelle matkalle pääeristeen päälle tai koko pääeristeeseen. Teoriassa puolijohtavien hiukkasten on mahdollista aiheuttaa osittaispurkauksia ja kaapelipäätteen asennusohjeissa mainitaan myös, että hohtosuojan päältä hiomista on varottava.

5.2.4 Asennus- ja käyttöolosuhteiden ongelmat

Mittauksiin kuului myös kaapelipäätteiden mekaanisen rasituksen vaikutuksen tutkiminen, tiiveystesti, ja vanhennuskoe.

Mekaaninen rasituskoe

Mekaanista rasitusta tutkittiin -20 °C lämpötilassa taivuttamalla päätettä kaapelikengästä lähtien koko päätteen matkalta noin 12,5 cm taivutussäteelle, kaapelin halkaisijan ollessa 3 cm. Työssä tutkittavien lämpö- ja kylmäkutistepäätteiden asennusohjeissa lopullinen taivutussäde asennettuna saa olla vähintään 20 kertainen kaapelin halkaisijaan nähden ja kylmäkutistepäätteelle alin sallittu asennuslämpötila on -25 °C. Mekaanisen rasituksen koe simuloi päätteen asennusta ahtaaseen paikkaan kylmässä lämpötilassa ja tarkoituksena oli tutkia, kuinka herkästi kaapelipäätteisiin syntyy osittaispurkauksia niitä väänneltäessä. Päätteitä H1, H2, C1 ja C2 taivuteltiin ja niistä mitattiin osittaispurkaukset.

Taivutuksia tehtiin ensimmäisessä kokeessa kaksi kappaletta vastakkaisiin suuntiin ja pidettiin ääriasennossa 5 sekuntia. Toisessa kokeessa valittiin H1 lämpökutistepääte, tehtiin 10 taivutusta molempiin suuntiin samoin, kuin ensimmäisessä kokeessa ja toistettiin mittausta. Lopulta sama pääte taivutettiin kaksinkerroin keskeltä ilman taivutussädettä rajoittavaa tukea. Pääte jäi lopulta noin 90 asteen kulmaan mittausten ajaksi.

Tiiveystesti

Tiiveystestissä päätteitä testattiin standardiin IEC 60502-4 pohjautuen niin kutsutun vesiupotuskokeen avulla pitämällä kaapelipäätteitä kuumassa vedessä noin 18 tuntia. Upotuksen jälkeen päätteet jäähdytettiin huoneenlämpöisessä vedessä ja niistä mitattiin osittaispurkaukset sekä eristysresistanssi. Vesi pidettiin upotuksen ajan 95 °C lämpötilassa ja 18 tunnin upotussyklejä tehtiin 3 kappaletta kaapelipäätteille C1, C2, H13 ja H14. Näistä päätteistä C1 ja C2 olivat jo läpikäyneet testauksen eri lämpötiloissa säähuoneessa sekä mekaanisen rasituksen kestokokeen, mutta suoriutuivat niistä virheettömästi. Päätteet H13 ja H14 oli ainoastaan mitattu vikavapaiksi ennen tiiveystestiä, eli niitä ei oltu rasitettu muulla tavoin. Tiiveystestin tarkoituksena oli tutkia päätteiden tiiveyttä sekä tutkia mahdollisesti päätteeseen tunkeutuvan veden vaikutuksia osittaispurkauksiin.

Tiiveystestin aikainen eristysresistanssimittaus suoritettiin Megger MIT1020/2 eristysresistanssimittarilla. Mittausta tehtiin jokaiselle päätteelle vesiupotusten välissä tunnin ajan 5120 V jännitteellä. Eristysresistanssimittaus tehtiin, koska vesiupotuskokeessa mahdollinen kaapelipäätteen sisälle päässyt vesi ei välttämättä näy

osittaispurkausmittauksissa, jos se oikosulkee eristeessä esiintyvät ontelot. Eristysresistanssin oletettiin kuitenkin muuttuvan, jos päätteen sisälle pääsee vettä.

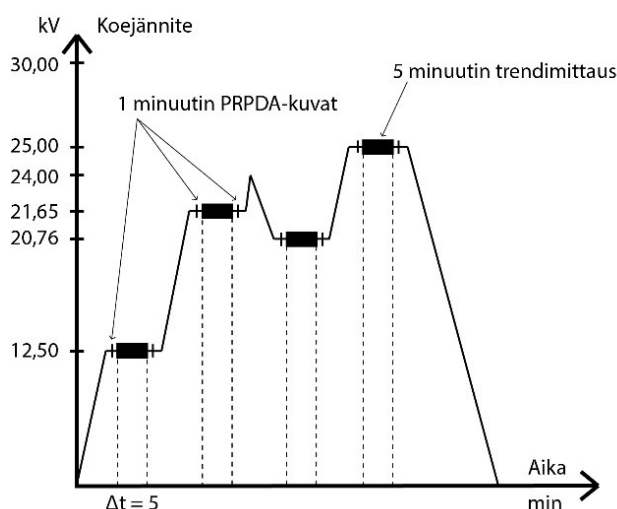
Vanhennuskoe

Työn loppuvaiheessa valittiin eräät aikaisemmissa mittauksissa osittaispurkauksia tuottaneet kaapelinäytteet TTY:n alueella sijaitsevalla ulkokoe kentällä tehtävää vanhennuskoetta varten. Ulkokoe kentällä oli käytettävissä 18 kV vaihejännite ja valitut päätteet altistettiin kyseiselle jännitteelle noin 6 viikon ajaksi. Pitkäaikaisrasituksen tarkoituksena oli tutkia kaapelipäätteissä jo olemassa olevien vikojen ja niiden aiheuttamien osittaispurkausten purkaustasojen kehittymistä vikakehityksen alkuvaiheessa. Vanhennuskokeen lopussa voidaan olettaa saavutetun ainakin jossain määrin tasaantunut purkaustaso, joka kokeen jatkuessa jatkaisi eristyksen rasittamista ja mahdollisesti johtaisi varsinaiseen vikakehitykseen ja lopulta eristysrakenteen vikaantumiseen. Vanhennuskoe aloitettiin 10.9.2018 ja lopetettiin 22.10.2018. Testissä olleista kaapelipäätteistä mitattiin osittaispurkaukset tällä aikavälillä 5 kertaa: 17.9.2018, 24.9.2018, 1.10.2018, 8.10.2018 ja 22.10.2018. Lisäksi osittaispurkauksia mitattiin vanhennuskokeen alussa 11.9.2018, 12.9.2018 ja 14.9.2018 päätteistä H3 ja H5, joista molemmat osoittivat suurta purkausaktiviteettia.

5.3 Mittausten toteutus

Kaikki tutkittavien kaapelipäätteiden mittaukset tehtiin pääosin seuraavassa järjestyksessä kuvan 5.13 mukaisesti:

1. Syttymis- ja sammumisjännitteiden mittaus enintään 30 kV asti,
2. 12,5 kV jännite 5 minuutin ajan, osittaispurkausmittaus,
3. 21,65 kV jännite 5 minuutin ajan, osittaispurkausmittaus,
4. Standardin IEC 60502 mukainen osittaispurkausmittaus 24 kV jännitteellä 10 sekunnin ajan ja sen jälkeen 20,76 kV jännite 5 minuutin ajan ja
5. lopuksi 25 kV jännite 5 minuutin ajan, osittaispurkausmittaus.



Kuva 5.13 Kaapelipäätteiden mittausjärjestys ja koejännitteet.

Tutkittavista kaapelipäätteistä mitattiin ensin purkauksen mahdolliset syttymis- ja sammumisjännitteet nostamalla jännitettä, kunnes purkauksia syttyi. Syttymisjännite todettiin, jos purkaukset pysyivät päällä yli 1 minuutin ajan. Sammumisjännite todettiin nostamalla jännitettä 20 prosenttia syttymisjännitteestä, pitämällä sitä vakiona 10 sekuntia ja laskemalla sitä hitaasti, kunnes purkaukset sammui. Jos purkauksia ei syttynyt 30 kV asti jännitettä nostettaessa, pääte todettiin purkauksettomaksi ja sille tehtiin pelkästään 25 kV mittaus purkauksettomuuden varmistamiseksi. Jos purkauksia syttyi, ultraäänipeilauksella varmistettiin, etteivät purkaukset olleet päätteen tai kaapelin pinnalla.

Syttymis- ja sammumisjännitekokeiden lisäksi päätteille tehtiin vaihejännitteen 12,5 kV, pääjännitteen 21,65 kV ja jännitetason 25 kV mittaukset. Myös standardin IEC-60502-2 mukainen jännitteen nosto 24 kV kymmeneksi sekunniksi ja sen jälkeen viiden minuutin mittaus 20,76 kV tasolla suoritettiin kyseisellä jännitetasolla purkauksia tuottaville näytteille. Jännitettä pidettiin jokaisessa kokeessa päällä viisi minuuttia ja jos purkauksia syttyi, tallennettiin PRPDA-kuviot ennen ja jälkeen varsinaisen jännitemittauksen yhden minuutin aikajaksolta. Lisäksi mittauksen aikana tallennettiin niin kutsutut 'purkaustrendit', eli osittaispurkaustaso ajan funktiona koko testin ajalta. Jännitettä ei laskettu eri jännitetasojen välissä alas.

Pitkäaikaisrasituksessa oleville päätteille tehtiin edellä mainittujen mittauksen lisäksi joitakin mittauksia myös 18 kV jännitetasolla. Mittauksissa käytettiin samaa jännitettä, kuin ulkokoekentällä oleva jännite oli, jotta saatiin tietoa mahdollisesta purkausaktiviteetista ulkokoekentän jännitetasolla. Kaikista osittaispurkausmittauksista tallennettiin mainittujen trendien ja PRPDA-kuvien lisäksi myös kaikki aiemmin kappaleessa 3.4 kuvatut jakaumat.

5.4 Tulokset

Tässä ja seuraavissa kappaleissa käsitellään eri vikatyypin mittaustuloksia. Mittauksissa kirjattiin ylös taulukoissa ja kuvaajissa esitettyjen suureiden lisäksi myös verkkojännitteen taajuus, mittaustilan lämpötila, ilmankosteus ja ilmanpaine sekä mittauksen aloitusaika ja kalibroinnin jälkeen havaittu pohjakohina. Edellä mainitut suuret mainitaan tulosten yhteydessä, jos niillä arvioidaan olevan vaikutusta mittaustuloksiin.

Ohjeiden mukaisesti asennettujen päätteiden purkauksettomuuden toteaminen

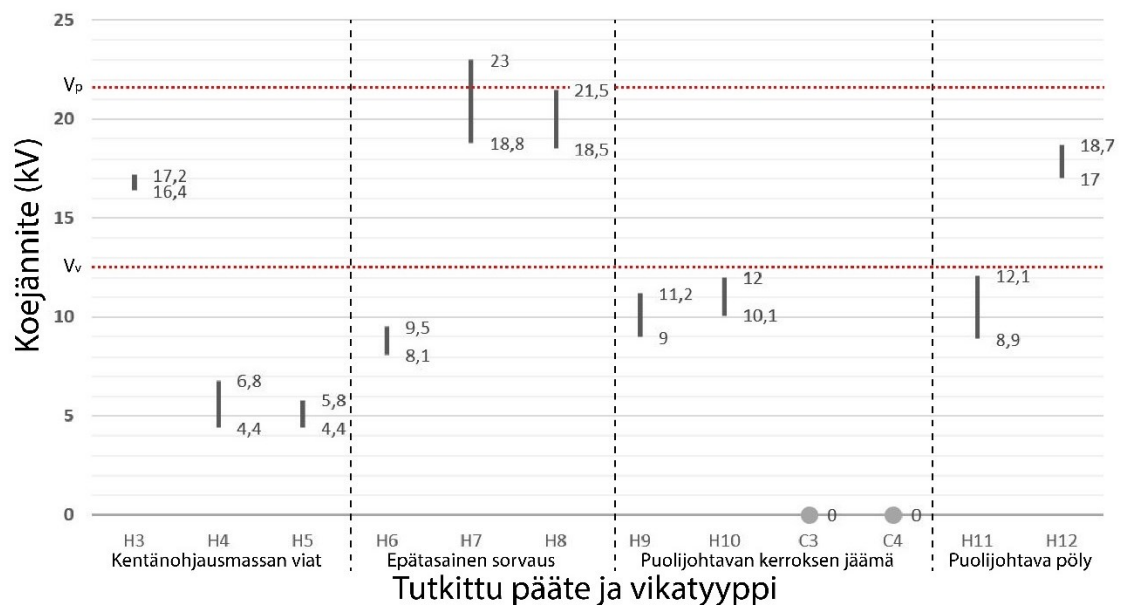
Vikavapaiksi asennettujen kylmäkutistepäätteiden mittauksissa tarkoituksena oli varmistaa päätteiden vikavapaus. Huomattavaa oli, että eräs koekappale ei läpäissyt osittaispurkausmittausta vaikka pääte oli tehty tarkasti ja ohjeita noudattaen. Näytteessä syttyi noin 110 pC purkaus 18 kV jännitteellä sammumisjännitteen ollessa 17 kV. Täten näyte ei läpäissyt yli 12,5 kV jännitteellä tehtäviä mittauksia ja sitä ei hyväksytty jatkokokeisiin. Eräässä toisessa koekappaleessa syttyi 3 pC purkaus 21 kV jännitteellä joka kasvoi 27 pC suuruiseksi 29 kV jännitetasolla. Purkaus osoittautui pintapurkaukseksi ja saatiin sammumaan asettamalla alumiininen kentänohjauspallo kaapelin kelluvan pään kaapelikengän päälle. Jälkimmäinen koekappale hyväksyttiin käytettäväksi viallisiksi asennettujen päätteiden testauksessa.

Lämpötilan vaikutus ohjeiden mukaisesti asennettuihin päätteisiin

Lämpötilan vaikutusta tutkittiin osittaispurkausmittauksilla, jotka suoritettiin suurjännitelaboratorion säähuoneessa lämpötiloissa $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pohjakohina oli mittauksesta riippuen 1,1-1,6 pC. Lämpötilojen vaihteluväli oli maksimissaan $+0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ säähuoneen asetusarvosta. Myös nämä päätteet siis tehtiin tarkoituksella vikavapaiksi. Huomioitavaa on, että päätteessä H1 syttyi noin 37 pC purkaus, joka pysyi päällä 25 kV jännitteellä huoneenlämpötilassa. Kaikki muut päätteet läpäisivät kaikki eri lämpötiloissa tehdyt kokeet. Ohjeiden mukaan tehtyjen päätteiden mittaaminen säähuoneessa antoi pohjatietoa muiden kylmäkutistepäätteiden kelvollisuudesta osittaispurkaustesteihin ja lisäksi tietoa siitä, kuinka Enston järjestämä työpäivän mittainen päätteenasennuskoulutus onnistui, eli kuinka hyvin tekijä oli oppinut päätteen tekemisen.

5.4.1 Osittaispurkausten syttymis- ja sammumisjännitteet

Viallisiksi asennettujen päätteiden osittaispurkausmittauksissa mitattiin ensin osittaispurkausten syttymis- ja sammumisjännitteet. Kuvassa 5.14 on esitettyinä vialliseksi tehtyjen kaapelipäätteiden syttymis- ja sammumisjännitteet sekä merkittynä myös vaihejännitetaso V_v sekä pääjännitetaso V_p .



Kuva 5.14 Viallisten päätteiden syttymis- ja sammumisjännitteet päätteittäin jaoteltuna. Päätteille C3 ja C4 ei ole merkitty arvoja, koska päätteet osoittautuivat purkauksettomiksi.

Kentänohjausmassan viat

Kentänohjausmassan virheellinen asennuksen tai sen puuttumisen tiedetään ainakin joissain olosuhteissa johtavan sisäisiin osittaispurkauksiin. Tämä tieto osoittautui tutkittujen päätteiden osalta todeksi jo hyvin alhaisillakin koejännitteillä. Mielenkiintoista mittauksessa oli se, että päätteen H3 purkausten syttymisjännite oli useita kertoja suurempi, kuin päätteiden H4 ja H5 syttymisjännitteet, vaikka siinä ei ollut kentänohjausmassaa asennettuna lainkaan. Oletettavasti päätteissä H4 ja H5 olleet kentänohjausnauhat pakottivat sähkökentän 'tiivistymään' kentänohjausnauhan ja hohtosuojan väliseen rakoon siten pienentäen niiden syttymis- ja sammumisjännitteitä. Päätteessä H4 kentänohjausmassa oli 3 mm päässä hohtosuojan reunasta ja päätteessä H5 12 mm päässä. Kentänohjausmassan sisältävät päätteet H4 ja H5 olivat syttymis- ja sammumisjännitteiden suhteen melko lähellä toisiaan.

Purkausaktiivisuus oli kaikissa tutkituissa päätteissä varsinkin suuremmilla mittaussjännitteillä hyvin vaihtelevaa. Tämä voi johtua siitä, että purkauskanavien muodostuminen oli mittausten aikana hyvin varhaisessa vaiheessa ja muutoksia materiaalissa tapahtui paljon.

Epätasainen sorvaus

Tässä koesarjassa tehtiin mittaukset lämpökutistepäätteille H6, H7 ja H8, joista kaikki oli asennettu hohtosuojan sorvauksen osalta huolimattomasti. Silmämääräisesti

arvioituna eri viat erosivat toisistaan vain vähäisesti. Asennusvaiheen kuvat vioista ovat esitettyinä kappaleessa 5.2.3.

Pääte H6 oli ainoa joka ei läpäissyt 12,5 kV testiä. Siinä syttyi noin 27 pC purkauksia jo kyseisellä mittausjännitteellä. Päätteessä H7 saman suuruisia purkauksia syttyi vasta 23 kV jännitetasolla ja syttymisjännite oli myös huomattavasti päätteen H6 syttymisjännitettä suurempi. Tämä ero voi johtua siitä, että päätteen H6 urat olivat visuaalisesti arvioiden hieman terävämpireunaisempia, mikä ilmeisesti heikensi enemmän kutistemateriaalin tiivistymistä eristeen pinnan päälle. Vaikka päätteessä H7 oli vielä erillinen lovi hohtosuojan ja pääeristeen rajapinnalla, päätteen H6 koko pääeristeen matkalla olevat syvät urat tuottivat tässä mittauksessa voimakkaampia purkauksia.

Pääte H8 oli asennettu samalla tavalla, kuin H6, mutta kuorintalaitteen jättämät syvät urat oli yritetty hioa pois mahdollisimman huolellisesti. Purkauksia kuitenkin syttyi päätteen H7 tapaan lähellä pääjännitteen jännitetasoa. Mahdollinen purkauspaikka on voinut jäädä esimerkiksi hohtosuojan ja pääeristeen rajapinnalle, jossa hiomanauhalla ei välttämättä pääse tarpeeksi lähelle hohtosuojaa irrottamatta siitä puolijohtavia hiukkasia, jotka ovat voineet kulkeutua pääeristeen pinnalle hiomanauhan mukana.

Puolijohtavan kerroksen jäämä

Päätteiden H9, H10, C3 ja C4 osalta tutkittiin tapauksia, joissa hohtosuojaa on jätetty pääeristeen pinnalle. Tuloksissa huomattavaa on, että kylmäkutistepäätteissä C3 ja C4 ei esiinny lainkaan osittaispurkauksia edes 30 kV mittausjännitteellä. Kentänohjaus on toteutettu kylmäkutistepäätteissä kutistelaipan sisälle ja on ilmeisesti ainakin tässä tapauksessa niin hyvä, että purkauksia ei synny, vaikka pääeristeen pinnalla on jäämiä puolijohtavasta kerroksesta. Kylmäkutistepäätteen kentänohjauskeila ulottuu noin 20 mm hohtosuojan reunalta sekä hohtosuojan että pääeristeen päälle. Vikapaikat päätteissä C3 ja C4 olivat 138 mm (C3) ja 146 mm (C4) päässä hohtosuojan reunasta, joten kylmäkutisteen kentänohjaus ei ollut hohtosuojajäämien päällä valmiissa päätteissä. Päätteissä H9 ja H10 hohtosuojajäämät olivat etäisyydellä 235 mm (H9) ja 80 mm (H10) hohtosuojan reunasta. Vaikka jäämät olivat näissäkin päätteissä melko kaukana hohtosuojan reunasta, niissä syttyi osittaispurkauksia jo alle vaihejännitteellä. Purkaustasot olivat keskenään samaa luokkaa. On selvää, että myös hohtosuojien jäämät pääeristeen pinnalla saavat aikaan suurehkoja osittaispurkauksia ja ovat kaapelipäätteen toimintavarmuudelle haitallisia.

Puolijohtava pöly

Kaapelipäätteet H11 ja H12 asennettiin hiomalla pääeristettä osittain hohtosuojan päältä. Päätteessä H11 hiomanauhalla hiottiin hohtosuojan reunalta noin 20 mm

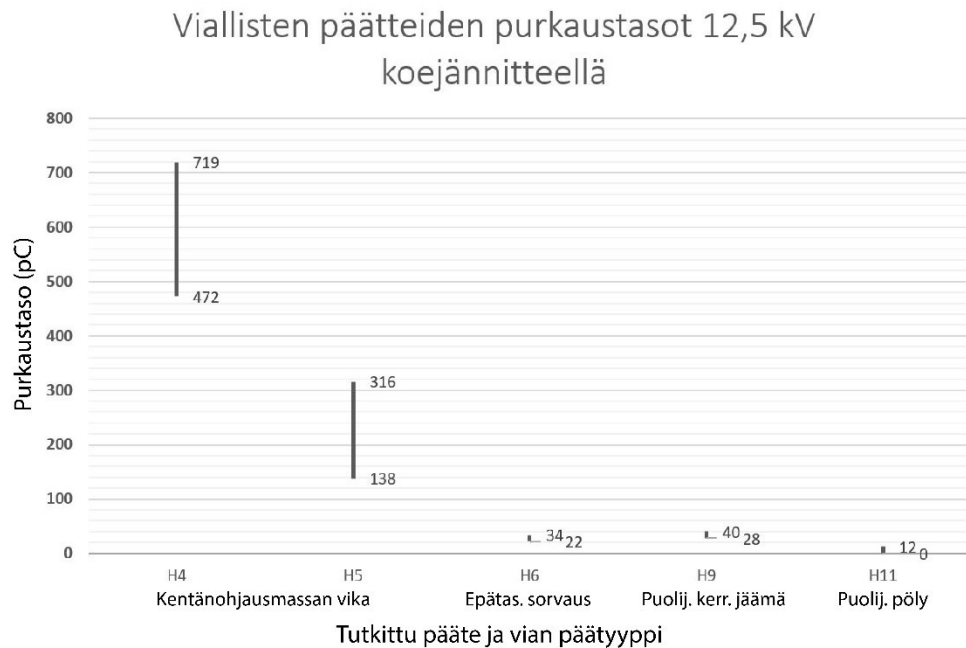
matkalle pääeristeen päälle ja päätteen H12 tapauksessa likaista hiomanauhaa käytettiin koko pääeristeen matkalla. Molemmissa tapauksissa pääeristeet puhdistettiin puhdistusliinalla ohjeen mukaisesti hiomisen jälkeen. Tuloksista nähdään, että purkauksia syntyi päätteessä H11 jo käyttöjännitettä pienemmällä jännitetasolla. Myös päätteessä H12 syntyi purkauksia suhteellisen alhaisella jännitteellä, alle pääjännitteen tason. Huomioitavaa mittaustuloksissa on, että kaapelipäätteiden asentamisen yhteydessä päätteeseen H12 aiheutettiin oletetusti vakavampi vika, puolijohtavan pölyn kattaessa koko pääeristeen pinnan. Kuitenkin päätteen H11 osittaispurkausten syttymisjännite oli yli 6 kV matalampi päätteeseen H12 verrattuna.

5.4.2 Purkaustasot ja -trendit

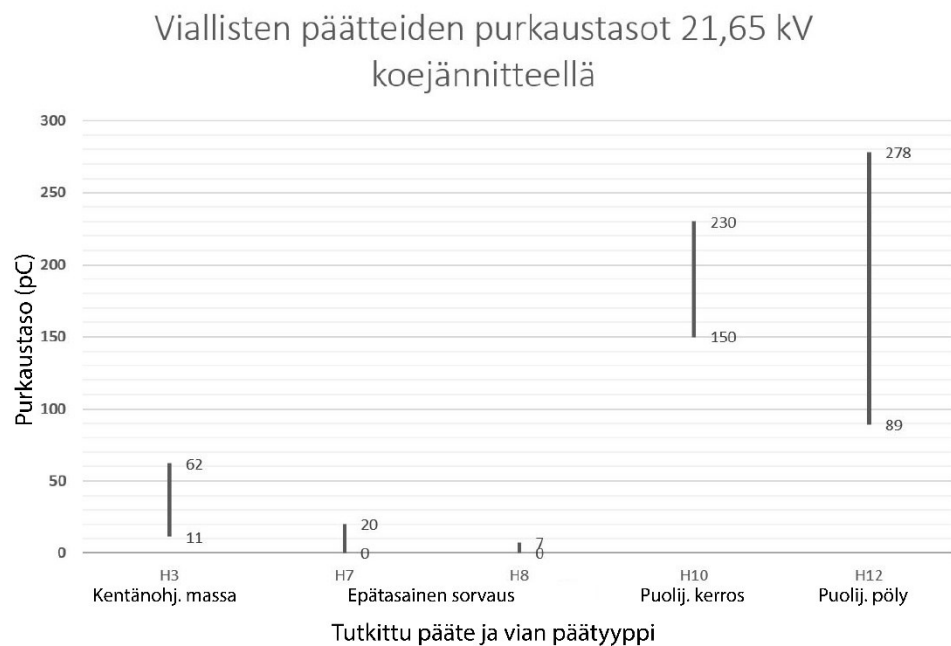
Osittaispurkausten syttymis- ja sammumisjännitteiden mittauksen jälkeen tehtiin mainituilla jännitetasoilla 5 minuutin pituiset purkaustason trendimittaukset, sekä juuri niitä ennen ja välittömästi niiden jälkeen 1 minuutin mittaiset PRPDA -mittaukset. Taulukossa 5.2 on esitettynä viallisten päätteiden viitteelliset osittaispurkausten vaihteluvälit mittausten ajalta jännitteillä 12,5 kV, 21,65 kV ja 25 kV. Kuvassa 5.15 on esitettynä päätteiden H4, H5, H6, H9 ja H11 12,5 kV mittauksen sekä kuvassa 5.16 päätteiden H3, H7, H8, H10, H12 21,65 kV mittauksen purkaustasoja trendimittausten ajalta.

Taulukko 5.2 Viallisten päätteiden osittaispurkaustasojen vaihteluvälit eri koejännitteillä.

Pääte / Mittausjännite	PD-taso (12,5 kV) [pC]	PD-taso (21,65 kV) [pC]	PD-taso (25 kV) [pC]
H3	-	11-62	3000-5000
H4	472-719	980-1800	1300-1500
H5	138-316	3700-9000	3500-4200
H6	22-34	37-50	70-106
H7	-	0-20	20-220
H8	-	0-7	0-14
H9	28-40	250-350	100-170
H10	-	150-230	230-300
C3	-	-	-
C4	-	-	-
H11	0-12 pC	40-72	150-210
H12	-	89-278	130-260



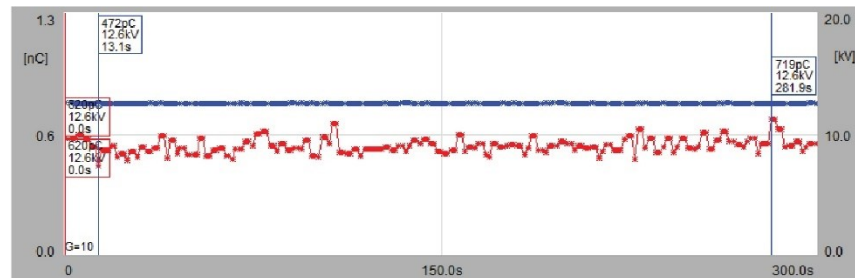
Kuva 5.15 Päätteiden H4, H5, H6, H9 ja H11 mittausten aikaisia purkaustasoja 12,5 kV jännitteellä.



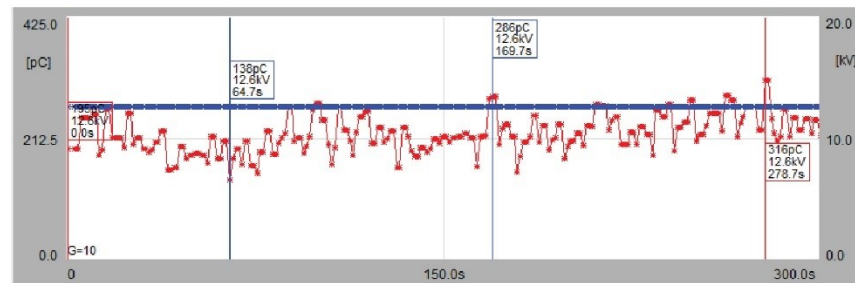
Kuva 5.16 Päätteiden H3, H7, H8, H10 ja H12 mittausten aikaisia purkaustasoja 21,65 kV jännitteellä.

Purkaustasoista on nähtävissä samankaltaisuuksia ainoastaan epätasaisesti sorvattujen päätteiden H7 ja H8 välillä. Tasot ovat verrattain matalia ja molemmissa purkausaktiivisuus käy välillä nollassa. Sorvauksesta aiheutuneet ontelot ovat luultavasti hyvin pieniä. Mittauspöytäkirjan mukaan mittausten aikana molempien

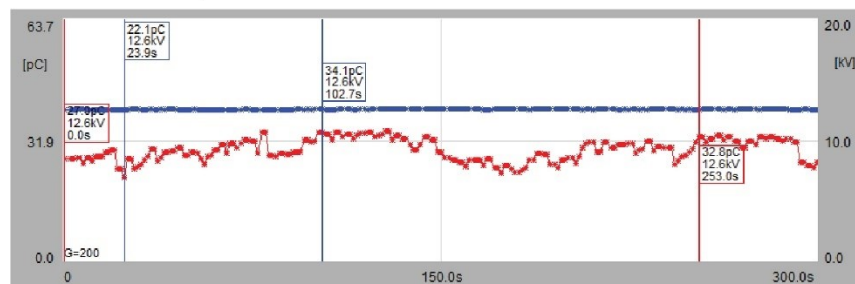
päätteiden purkaustasot olivat vaihtelevia. Pääteistä H8 ja H11 ei ollut saatavilla trendikäyriä. Kuvissa 5.17 ja 5.18 on esitettyä saatavilla olleet viallisten päätteiden 12,5 kV ja 21,65 kV mittausten trendit lähellä päätteiden purkausten syttymisjännitteen tasoa.



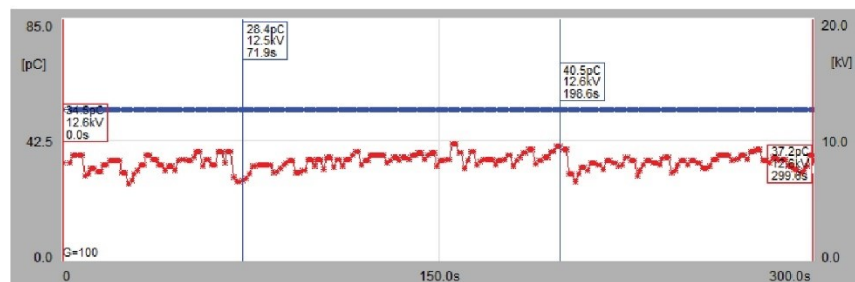
Pääte H4 - Jännite 12,5 kV



Pääte H5 - Jännite 12,5 kV

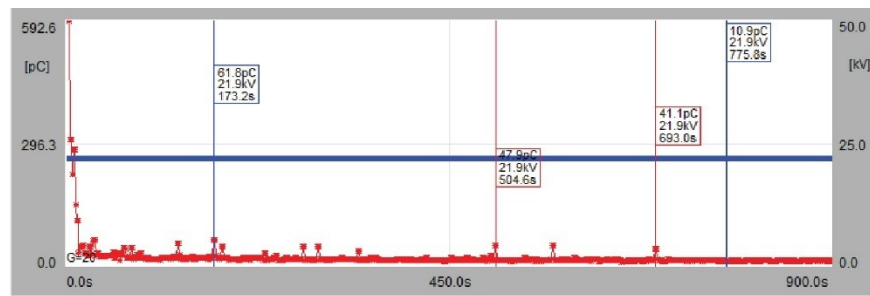


Pääte H6 - Jännite 12,5 kV

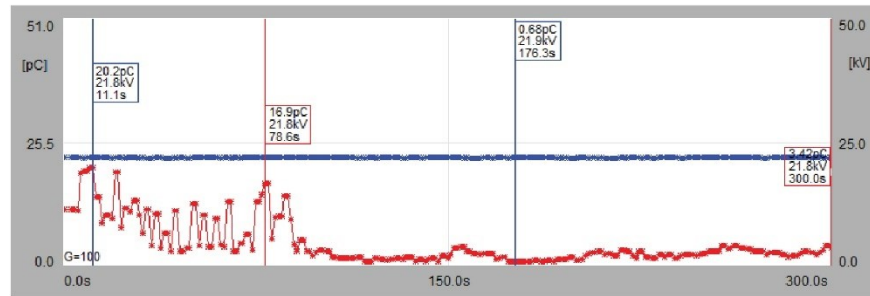


Pääte H9- Jännite 12,5 kV

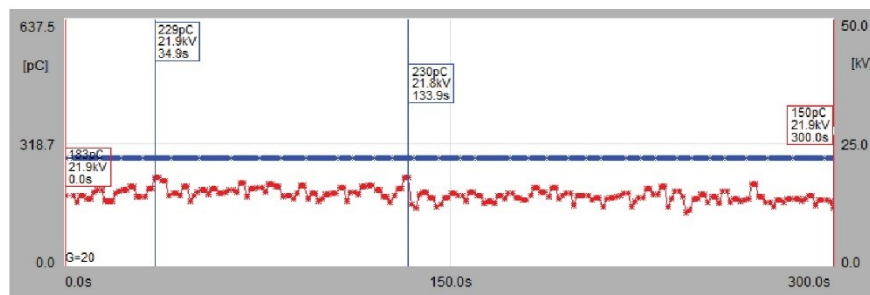
Kuva 5.17 Trendikuvaajat päätteiden H4, H5, H6 ja H9 12,5 kV mittauksesta.



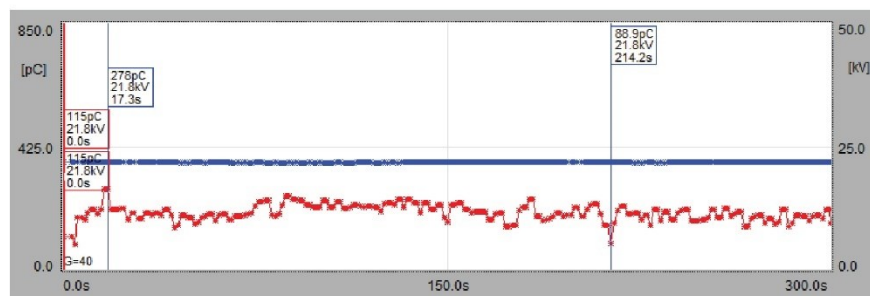
Pääte H3 - Jännite 21,65 kV



Pääte H7 - Jännite 21,65 kV



Pääte H10 - Jännite 21,65 kV



Pääte H12 - Jännite 21,65 kV

Kuva 5.18 Trendikuvaajat päätteiden H3, H7, H10 ja H12 21,65 kV mittauksesta.

Kentänohjausmassan viat

Pääte H3 oli asennettu siten, että kentänohjausmassa oli jätetty kokonaan pois hohtosuojan ja pääeristeen rajalta. Purkaukset syttyivät 17,2 kV jännitteellä ja olivat 21,65 kV mittauksen ajan pääasiassa noin 10-20 pC tasolla. Suurempia, 40-60 pC purkauksia esiintyi satunnaisesti. 25 kV mittauksessa purkaustaso nousi ja purkauksia esiintyi 4600 pC tasoilla. Mittauksen jatkuessa 270 sekunnin yli purkausten voimakkuus pieneni 25 kV mittauksessa noin 80 pC tasolle.

Päätteen H4 syttymisjännite oli 6,8 kV ja sammumisjännite 4,4 kV. Mittauksissa havaittiin noin 500-700 pC purkauksia melko tasaisesti 12,5 kV jännitteellä, noin 1,0-1,5 nC purkauksia 21,65 kV jännitteellä ja kokeen jatkuessa 1,3-1,5 nC purkauksia koejännitteellä 25 kV. Purkausaktiivisuus oli vaihtelevaa varsinkin suuremmilla mittausjännitteillä ja vaikka jännitettä nostettiin lopussa, purkausten voimakkuus pieneni mittausten aikana osoittaen kokonaisuudessaan laskevaa trendiä.

Pääte H5 oli asennettu samalla tavalla kuin H4, mutta kentänohjausmassan ja hohtosuojan väliin oli jätetty suurempi, noin 12 millimetrin mittainen rako. Myös tätä päätettä asennettaessa oletettiin, että kentänohjausmassa leviää puristuksen ja lämmön vaikutuksesta jonkin verran, mutta ei välttämättä saavuta hohtosuojan reunaa. Päätteitä avatessa päätteen H4 kentänohjausmassan ja hohtosuojan välinen rako oli 3 mm ja päätteen H5 8 mm. Mittauksissa päätteessä H5 syttyi osittaispurkauksia päätteen H4 tavoin jo hyvin alhaisella jännitteellä, 5,8 kV tasolla. Purkausten sammumisjännite oli päätteen H4 tavoin 4,4 kV. 12,5 kV mittauksessa purkaustaso pysyi noin 200-230 pC tasolla ja loppua kohden nousi hieman, mutta 21,65 kV mittauksessa purkauksia esiintyi yli 8 nC tasolla. Samoin, kuin päätteen H4 tapauksessa viimeisen mittauksen purkaustaso pieneni ajan kuluessa jonkin verran, vaikka jännite oli 25 kV. Mittauksen lopussa purkaustaso oli tasaisesti noin 3,5 nC.

Epätasainen sorvaus

Purkaustaso 12,5 kV jännitteellä oli päätteessä H6 noin 20-30 pC ja nousi 25 kV jännitteellä 70-106 pC tasolle. Päätteessä H7 purkaukset syttyivät vasta 23 kV tasolla ja sen 21,65 kV purkaustaso oli noin 3-20 pC. 25 kV kokeessa päätteen H7 purkaukset olivat välillä 19-175 pC. Purkaustasot vaihtelivat molemmissa päätteissä mittauksen aikana huomattavasti. Päätteen H8 purkaukset syttyivät vasta 21,5 kV jännitteellä, purkaustaso 21,65 kV mittauksessa oli aluksi 5-7 pC ja lisäksi purkaukset sammuiivat kokonaan melko nopeasti 5 minuutin testin edetessä. 25 kV mittausjännitteellä purkaustaso oli 14 pC tasolla. Trendi 21,65 kV jännitteellä oli alussa hyvin vaihteleva, mutta tasoittui 5 minuutin mittauksen loppua kohti.

Epätasaisen sorvauksen sisältävien päätteiden mittaustuloksista on mahdollista nähdä, että päätteet H7 ja H8 olivat pääjännitetason mittauksessa samaa luokkaa kuten syttymis- ja sammumisjännitteidenkin suhteen. Päätteessä H6 syttyi purkauksia huomattavasti matalammalla tasolla kuin päätteissä H7 ja H8. Lisäksi päätteen H8 oletettiin ennen mittauksia osoittavan pienintä purkausaktiivisuutta pääeristeen erittäin huolellisen hionnan vuoksi. Koetuloksista kuitenkin nähdään, että myös hohtosuojan epätasainen sorvaus voi aiheuttaa sisäisiä osittaispurkauksia, vaikka epätasaisuudet olisi yritetty hioa pois mahdollisimman hyvin. Purkausaktiivisuus oli kaikissa päätteissä ainakin jossain kohtaa mittausta hyvin vaihtelevaa ja päätettä H6 lukuunottamatta vaihtelivat pääjännitetasolla purkausaktiiviteetit yleisesti ottaen pieniä.

Puolijohtavan kerroksen jäämä

Päätteen H10 12,5 kV mittauksen aikana syttyi noin 4 pC purkaus joka kasvoi yli 200 pC ja 300 pC purkauksiksi 21,65 kV ja 25 kV mittausten aikana. Päätteessä H9 syntyi 35 pC purkaus 12,5 kV jännitteellä ja edelleen 21,65 kV jännitteellä purkaustaso kasvoi 250 pC tasolta 350 pC purkaustasolle, mutta oli muuten tasaista. 25 kV mittauksessa päätteen H9 purkaustaso lopulta pieneni hieman noin 170 pC tasolle sen loppua kohden.

Päätteiden H9 ja H10 trendimittauksissa purkaustasojen voidaan sanoa olleen melko tasaisia, eikä niissä siten havaittu selvää laskevaa tai nousevaa trendiä. Myös näiden päätteiden syttymis- ja sammumisjännitteet olivat hyvin lähellä toisiaan, joten voidaan arvioida, että hohtosuojan jäämien aiheuttamat ilmiöt ovat ainakin näissä mittauksissa lähellä toisiaan.

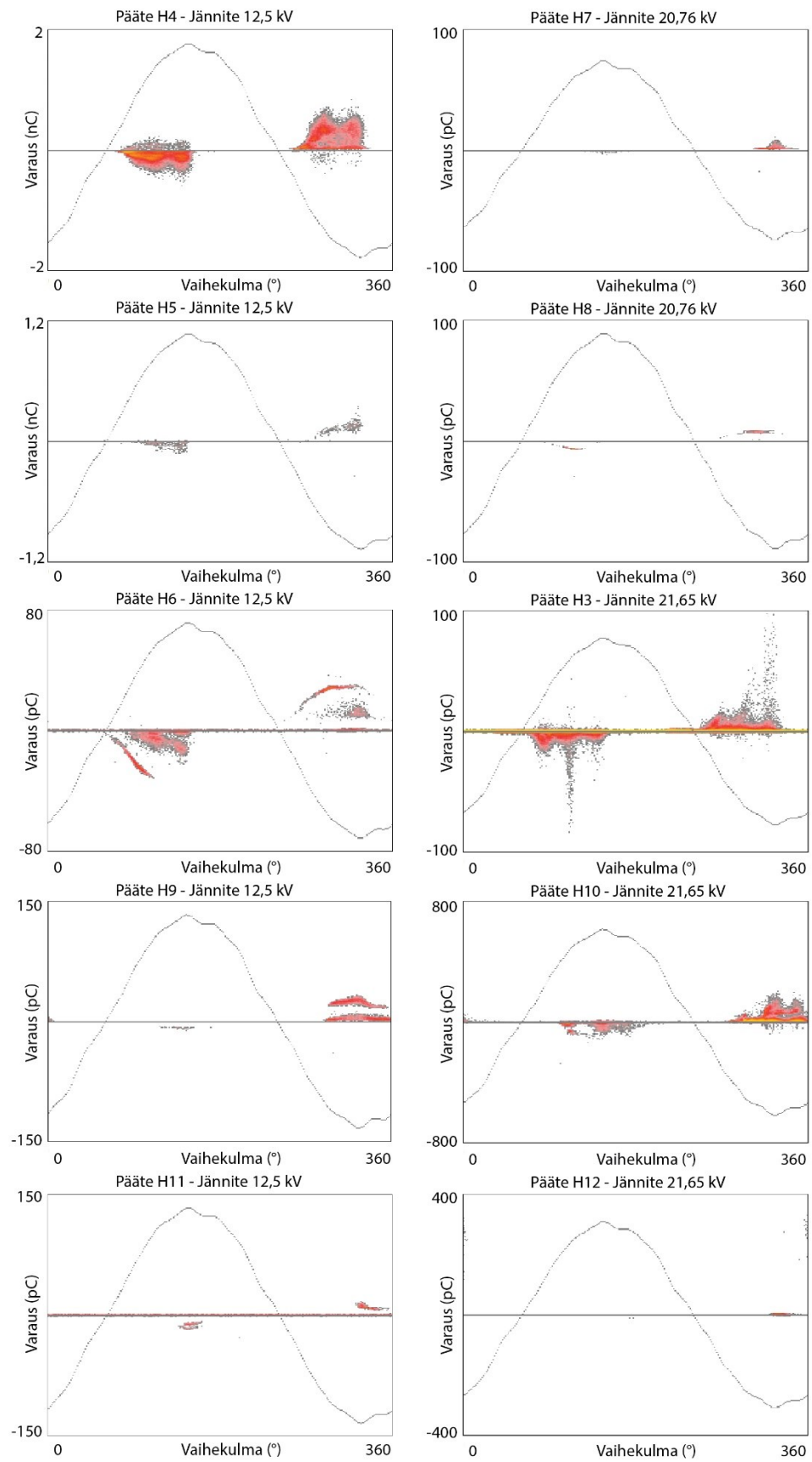
Puolijohtava pöly

Päätteen H11 purkaustaso oli noin 12 pC 12,5 kV jännitetasolla, 40-70 pC 21,65 kV jännitetasolla ja 150-210 pC 25 kV jännitetasolla. Päätteessä H12 purkaustaso vaihteli 21,65 kV mittauksessa 89 pC ja 280 pC välillä. 21,65 kV mittaus on puolijohtavan pölyn aiheuttaman vian omaavissa päätteissä ainoa koejännite, jolla niissä on havaittavissa saman tasoista purkausaktiivisuutta. Molempien päätteiden trendit ovat melko tasaisia vaikka puolijohtavaa pölyä on toisessa päätteessä koko pääeristeen matkalla ja toisessa vain 20 mm matkalla. On yllättävää, että puolijohtava pöly aiheutti näinkin paljon osittaispurkauksia. Johtavien hiukkasten tiedetään vääristävän sähkökenttää paikallisesti ja siten aiheuttavan kenttään tihentymiä, jolloin esimerkiksi mahdollisesti rajapinnoilla olevissa pienissä ilmaonteloissa ilman läpilyöntilujuus voisi ylittyä. Toisaalta pöly on hyvin hienojakoista, minkä vuoksi sen mahdollisesti aiheuttamien onteloiden täytyy olla vähintäänkin hyvin pieniä. Tässä mittauksessa tutkittuihin päätteisiin ei tarkoituksella jätetty ilmaonteloita.

Erilailta aiheutettujen vikojen välillä ei ole purkausten syttymis- ja sammumisjännitteiden tai vika-aktiivisuuden alkuvaiheiden trendikäyrien suhteen nähtävissä merkitseviä yhtäläisyyksiä. Kappaleessa 5.4.5 on esitettyä vanhennuskokeen tulokset ja siinä käsitellään eniten vika-aktiivisuutta osoittaneita kaapelipäätteitä.

5.4.3 PRPD -pulssikuvioiden analyysi

Jokaisesta mittauksesta tallennettiin PRPDA-kuva 1 minuutin ajalta ennen ja jälkeen 5 minuutin trendimittauksen. Kuvassa 5.19 on esitettyä viallisten päätteiden PRPDA-kuvat syttymisjännitettä lähinnä olevan 5 minuutin trendimittauksen jälkeen.



Kuva 5.19 Viallisten päätteiden PRPDA-kuvat läheltä syttymisjännitettä.

Kentänohjausmassan viat

Päätteiden H3, H4 ja H5 PRPDA-kuvista on nähtävissä, että purkaukset syttyvät kaikissa päätteissä jännitteen nousevalla ja laskevalla osalla nollakohtien jälkeen. Purkauskuviot ovat keskenään saman tyyllisiä, vaikka joissakin kuvioissa purkauksia on selvästi enemmän. Lisäksi päätteen H3 osalta purkauskuvio on hieman jakautunut ja päätteessä syttyy varaukseltaan hyvin suuria purkauksia. Ei ole täysin selvää, johtuuko tämä suuresta syttymisjännitteestä ja sen johdosta kuvan tallentamisen aikana olleesta 21,65 kV mittausjännitteestä vai vian luonteesta. Pääte H3 vikaantui myöhemmin pitkäaikaisrasituskokeessa.

Epätasainen sorvaus

Päätteiden H6, H7 ja H8 kuvioista on nähtävissä, että osa päätteen H6 kuviosta vastaa päätteen H8 kuviota molemmilla jännitteen puolijaksoilla ja toinen osa päätteen H6 kuviosta on hieman saman näköinen kuin päätteen H7 kuvion negatiivisen jännitteen puolijakson kuvio. Päätteen H6 kuviosta on havaittavissa useampia 'purkauskeskittymiä' mikä viittaa useampaan merkittävään purkausonteloon.

Puolijohtavan kerroksen jäämä

Päätteiden H9 ja H10 kuvista on nähtävissä, että purkauskuviot ovat hieman saman luonteisia keskenään. Kuitenkin päätteen H9 purkausaktiivisuus on ollut huomattavasti päätettä H10 pienempää ja sen kuvio on jakautunut jännitteen negatiivisella puolijaksolla kahteen osaan kun taas päätteen H10 kuvio on melko yhtenäinen. Hohtosuojaajämät pääeristeen pinnalla olivat epäsymmetrisen muotoisia ja purkauksia on luultavasti syttynyt hieman eri kohdissa hohtosuojaajäämää riippuen sen geometrisesta muodosta.

Puolijohtava pöly

Päätteiden H11 ja H12 kuvista on nähtävissä, että purkaustasot ovat keskimäärin erilaiset. Lisäksi kuvioista ainostaan jännitteen negatiivisen puolijakson kuviot ovat hieman samanlaisia. Kokonaisuudessa kuviot ovat kuitenkin erilaiset. On mahdotonta sanoa, kumpi vika on vakavampi ja kuinka paljon puolijohtavia hiukkasia hiomisen ja kaapelin eristeen puhdistamisen jälkeen sen pinnalle jäi ja mikä niiden vaikutus vikoihin on. On kuitenkin selvää, että puolijohtavat hiukkaset synnyttävät suurehkoja sisäisiä osittaispurkauksia ja niiden joutumista pääeristeen pinnalle on vältettävä, vaikka eriste puhdistettaisiin puhdistusliinalla hiomisen jälkeen, kuten ohjeissa on kerrottu.

Tutkituista vioista useimmat ovat lähtökohtaisesti saman tyyppisiä keskenään ja lisäksi useimmissa tapauksissa purkaloivia onteloita on rakenteessa useita. Kuitenkin

purkaukuvioista on vaikea erottaa niitä toisistaan erottavia piirteitä, koska purkauksia kertyy kuvioon useista onteloista ja lopullinen kuvio on näiden yhdistelmä.

5.4.4 Taivutuskoe ja tiiveyskoe

Taivutuskoe

Kaapelipäätteiden H1, H2, C1 ja C2 kestävyyttä mekaanisen rasituksen alaisena tutkittiin taivutuskokeessa lähellä pienintä sallittua asennuslämpötilaa ($-25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Kokeessa jäljiteltiin tilannetta, jossa päätteellä varustettua kaapelia asennetaan kylmissä olosuhteissa ahtaaseen paikkaan. Kaikki päätteet taivutettiin ensin päätteen alkamiskohdasta alkaen 25 cm taivutussäteelle pyöreän kappaleen ympärille kaksi kertaa vastakkaisiin suuntiin. Pääte H1 taivutettiin vielä useamman kerran ja lopuksi vielä ilman taivutussädettä rajoittavaa tukea.

Ensimmäisen taivutuksen jälkeen ainoastaan 25 kV mittauksessa esiintyi osittaispurkauksia. Purkaukset olivat kuitenkin pääsääntöisesti 1-2 pC ja enintäänkin 10 pC suuruisia ja syttyivät hyvin satunnaisesti, joten lämpökutistepääte H1 valittiin materiaaliensa luonteen vuoksi jatkokokeisiin. Taivutuksissa huomattiin, että lämpökutistepääte taipui paljon huonommin ja vaati enemmän voimaa taivutukseen, kuin kylmäkutistepääte. Kylmäkutistepäätteet myös palautuivat taivutuksesta lähes normaalitilaan melko nopeasti, kun lämpökutistepäätteet jäivät jonkin verran taipuneeseen asentoon.

Pääte H1 taivutettiin samoissa olosuhteissa toisessa kokeessa vielä 10 kertaa puolelta toiselle ja siitä mitattiin osittaispurkaukset. Purkaustaso oli samaa luokkaa, kuin edellisessä mittauksessa, mutta purkausaktiiviteetti oli hieman jatkuvampaa. Päätettä taivutettiin vielä ilman taivutussädettä tukevaa rakennetta molempiin suuntiin niin, että pääte taipui kaksin kerroin. Purkausaktiiviteetti pysyi tämänkin taivutuksen jälkeen enintään 4-5 pC tasolla 12,5 kV ja 25 kV mittauksissa ja oli hyvin vaihtelevaa.

Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että kaapelipäätteiden asentaminen ja taivuttelu kylmissä olosuhteissa ei välttämättä ole päätteen toiminnan kannalta erityisen vaarallista. Kuitenkin on tärkeää noudattaa kaapelipäätevalmistajan ohjeita suurimmasta sallitusta taivutuksesta sekä asennuksen aikana, että lopullisessa asennuspaikassa. Myös päätteiden kylmintä sallittua asennus- ja käyttölämpötilaa on syytä noudattaa. Tällä tavoin voidaan välttää taivutuksesta mahdollisesti johtuvat ongelmat.

Tiiveyskoe

Tiiveyskokeessa tutkittiin veden tunkeutumisherkkyyttä kaapelipäätteen sisälle. Se tehtiin taivutuskokeen jälkeen ja siinä käytettiin päätteitä C1, C2 ja aiemmin

käyttämättömiä, purkausvapaiksi todettuja päätteitä H13 ja H14. Päätteet upotettiin 18 tunnin ajaksi 95 °C veteen. Päätteistä mitattiin osittaispurkaukset aiemmin mainituilla menetelmillä ja lisäksi tehtiin jokaisen upotussyklin jälkeen eristysresistanssimittaus Megger eristysresistanssimittarilla 5 kV jännitteellä. Eristysresistanssia mitattiin tunnin ajan jokaisessa mittauksessa. Taulukoissa 5.3 ja 5.4 on esitettyä tiiveyskokeen tulokset.

Taulukko 5.3 Kaapelipäätteiden tiiveyskokeen mittaustulokset.

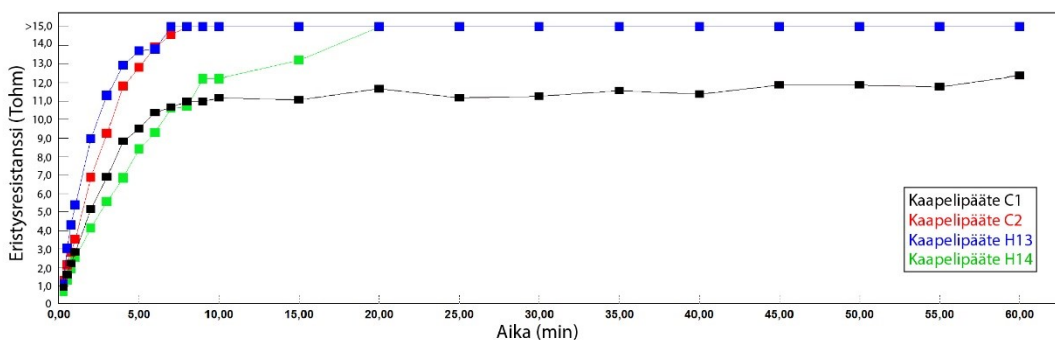
Upotuksen kokonaisaika (h)	Pääte	V _i (kV)	V _e (kV)	Purkaustaso (pC)
18	H13	-	-	Ei purkauksia
18	H14	20,0	19,6	0-153
18	C1	-	-	Ei purkauksia
18	C2	-	-	Ei purkauksia
36	H13	-	-	Ei purkauksia
36	H14	22,0	21,0	0-200
36	C1	18,0	14,6	30-200
36	C2	-	-	2,5
54	H13	-	-	Ei purkauksia
54	H14	22,0	20,7	0-250
54	C1	4,8	4,2	60-240
54	C2	-	-	Ei purkauksia

Taulukko 5.4 Tiiveyskokeessa mitattujen kaapelipäätteiden eristysresistanssit ja vuotovirrat.

Upotuksen kokonaisaika (h)	Pääte	Eristysvastus lopussa (TΩ)	1 min (TΩ)	10 min (TΩ)	Vuotovirta lopussa (nA)	1 min (nA)	10 min (nA)	PI
18	H13	>15,0	6,26	>15,0	0,17	0,82	0,19	-
36	H13	>15,0	2,54	12,2	0,18	2,01	0,42	4,78
54	H13	>15,0	3,88	14,7	0,21	1,32	0,35	3,79
18	H14	>15,0	3,04	>15,0	0,19	1,68	0,30	-
36	H14	>15,0	5,36	>15,0	0,21	0,96	0,27	-
54	H14	>15,0	3,86	>15,0	0,17	1,33	0,28	-
18	C1	14,9	3,19	13,8	0,34	1,60	0,37	4,32
36	C1	12,3	2,81	11,1	0,42	1,82	0,46	3,96
54	C1	13,9	3,69	14,4	0,37	1,39	0,36	3,89
18	C2	>15,0	8,52	>15,0	0,15	0,60	0,25	-
36	C2	>15,0	3,51	>15,0	0,26	1,46	0,30	-
54	C2	>15,0	5,32	>15,0	0,15	0,96	0,27	-

Kuten tuloksista nähdään, kaapelipäätteen C1 vuotovirta on jo ensimmäisen upotuksen jälkeen hieman muiden päätteiden vuotovirtoja suurempi. Kuvassa 5.20 on esitettyä

kaikkien tutkittujen päätteiden eristysresistanssikuvaajat toisen upotuksen jälkeen. Myös eristysresistanssista nähdään, että päätteen C1 arvo on muita päätteitä matalampi ja pysyy noin 11-12 teraohmin alueella kokeen loppua kohden. Kuvassa päätteiden C2, H13 ja H14 eristysresistanssit ovat kokeen lopussa siis yli mittalaitteen mittausalueen, 15 Tohm.



Kuva 5.20 Tiiveyskokeen eristysresistanssimittausten tulokset. Kaapelipäätteet C1, C2, H13 ja H14.

Kokeen tarkoituksena oli tutkia päätteiden tiiveyttä, sekä päätteen sisälle mahdollisesti päässeän kosteuden mahdollisesti aiheuttamaa osittaispurkausaktiiviteettia. Pääte H13 oli ainoa, jossa ei syttynyt purkauksia missään vaiheessa tiiveyskokeen mittauksia. Myös sen eristysresistanssikäyrä saa suurempia arvoja heti kokeen alusta lähtien, kuin muiden päätteiden käyrät. Päätteen C2 osalta eristysresistanssikäyrä näyttää hyvin samanlaiselta kuin päätteen H13 käyrä ja purkausaktiivisuuttakin siinä oli vain muutama picocoulomb toisen upotuksen jälkeen. Kaapelipääte H14 ja C1 taas osoittivat kohtalaista purkausaktiivisuutta, H14 heti ensimmäisen upotuksen jälkeen ja C1 alkaen toisesta upotuksesta. Purkausaktiivisuus oli molemmissa hyvin vaihtelevaa.

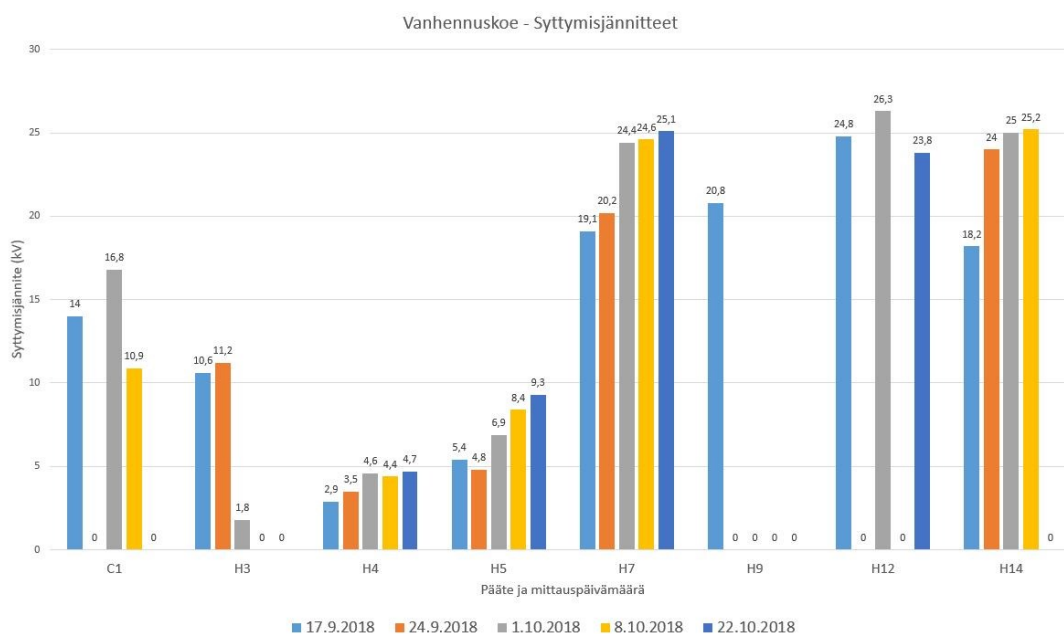
Päätteen sisälle päässeän veden ei teoriassa pitäisi näkyä osittaispurkausaktiivisuutena varsinkaan, jos vesi oikosulkee mahdolliset ontelot, mutta veden tunkeutuminen päätteen sisälle saattaa mahdollisesti aiheuttaa päätteen rajapinnoilla sellaisia mekaanisia muutoksia jotka edelleen voivat aiheuttaa osittaispurkauksia. Tästä syystä mittauksissa mitattiin myös eristyksen vuotovirtoja, mikä saattaisi paljastaa eristeeseen tunkeutuneen veden vaikka osittaispurkauksia ei esiintyisikään.

Oletettavaa on, että lämpökutisteen materiaalit ovat voineet kutistua kuumassa vedessä lisää ja siten tiivistää päätettä entisestään. Kylmäkutistepääte C1 oli ainoa, jonka eristysresistanssi ei mittauksen loppua kohden missään mittauksessa noussut yli mittarin mittausalueen vaan jäi 12-13 teraohmin välille. Oletettavasti päätteen C1 sisälle on päässyt vettä jo ensimmäisessä upotuksessa, mikä vaikuttaa eristysresistanssiin ja eristyksen läpi kulkevaan vuotovirtaan. Yhteenvetona voidaan sanoa, että päätteet olivat

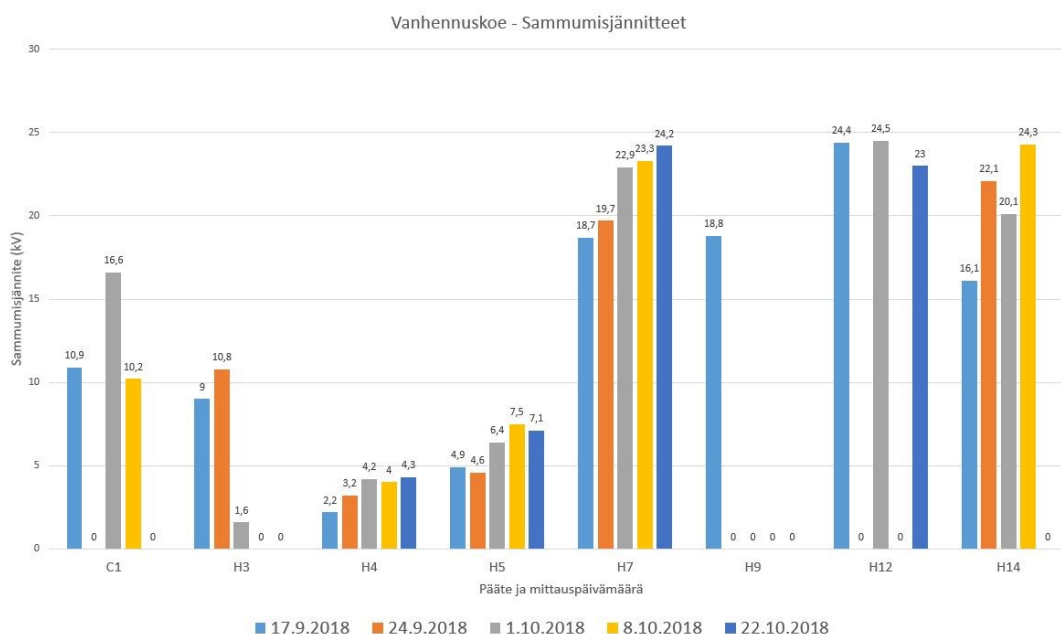
erittäin tiiviitä. Niihin ei päässyt ainakaan merkittävää määrää vettä kolmannenkaan upotusjakson aikana.

5.4.5 Vanhennuskoe

Vanhennuskokeeseen valittiin aiemmissa testeissä korkeaa purkausaktiivisuutta osoittaneita kaapelipäätteitä. Kokeen tarkoituksena oli kerätä tietoa purkausaktiiviteettien kehittymisestä tyypillisiä laboratoriomittauksia oleellisesti pidemmällä aikajänteellä. Vanhennuskoe toteutettiin 18 kV jännitteellä ja päätteiden annettiin olla jännitteen vaikutuksen alaisena noin 6 viikon ajan. Kyseisen jakson pituinen vanhennuskoe ei kuitenkaan edusta todennäköisesti vielä merkittävää ajanjaksoa päätteiden koko eliniästä ja käsitystä niiden koko vikaantumiskäytöksestä ei tämän testin tuloksista voi siten saada. Kuvissa 5.21 ja 5.22 on esitettyä vanhennuskokeessa olleiden kaapelipäätteiden syttymis- ja sammumisjännitteet kokeen ajalta.



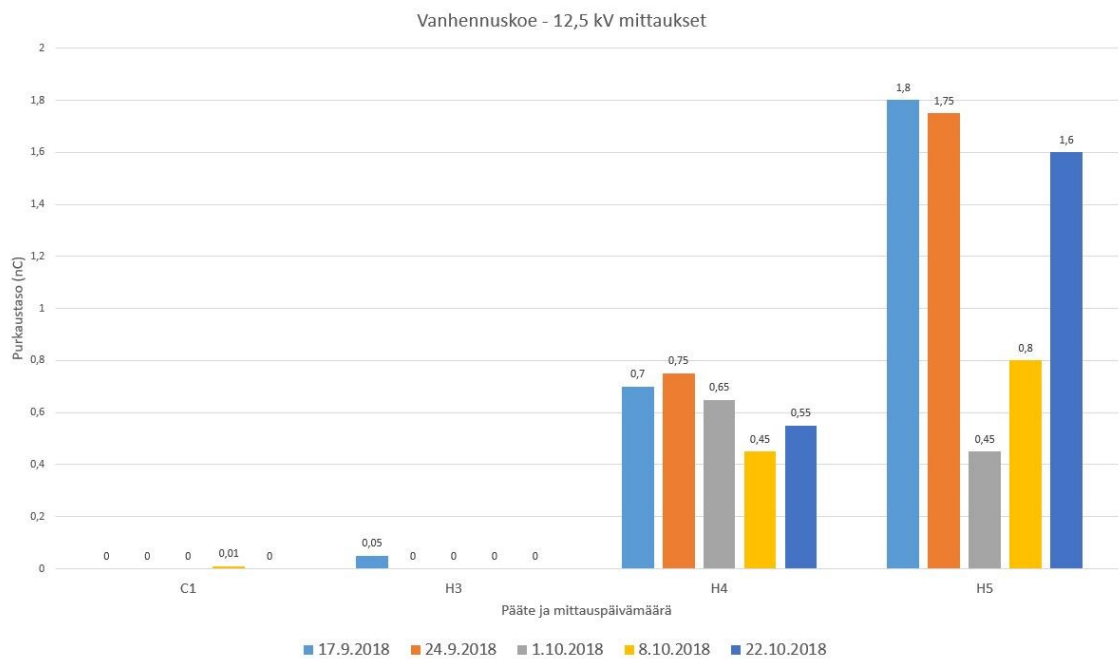
Kuva 5.21 Vanhennuskokeen mittauksen syttymisjännitteet.



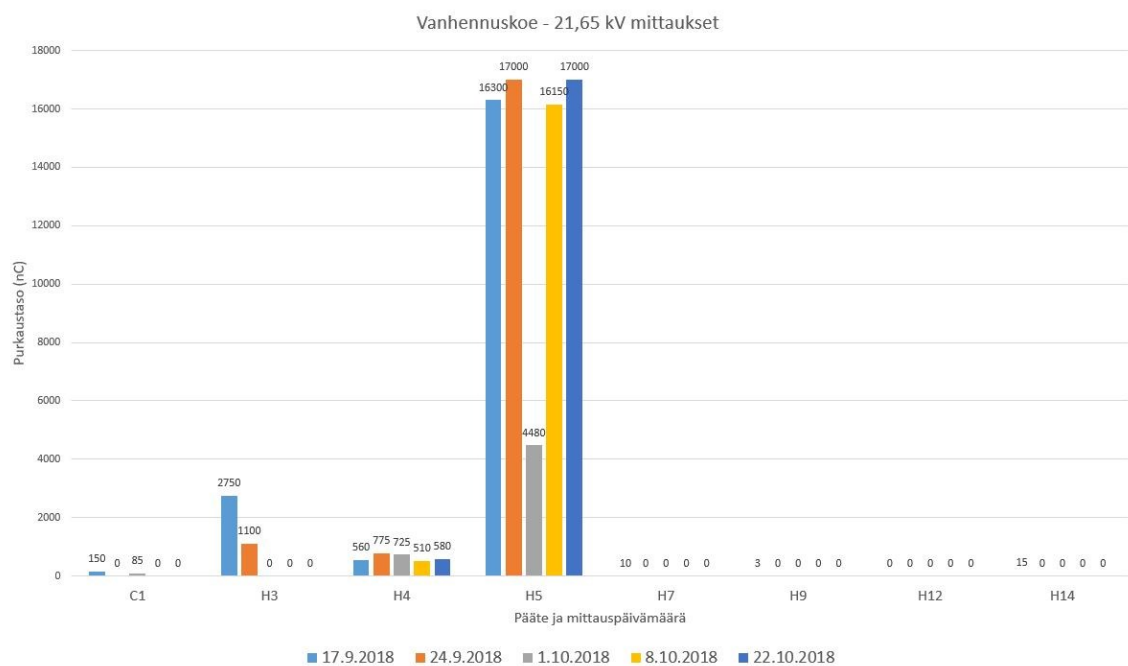
Kuva 5.22 Vanhennuskokeen mittausten sammumisjännitteet.

Syttymis- ja sammumisjännitteistä on nähtävissä, että päätteiden H4, H5, H7, H9 ja H14 trendi oli kasvava. Pääteessä H14 ei lopulta syttynyt purkauksia ollenkaan. Muiden päätteiden trendit syttymis- ja sammumisjännitteiden suhteen olivat melko satunnaisia. Viallisen kentänohjauksen päätteistä päätteiden H4 ja H5 trendit mukailivat toisiaan, mutta pääte H3 vikaantui. Muita yhtäläisyyksiä syttymis- ja sammumisjännitteistä ei ole nähtävillä.

Tulosten analysoinnissa on otettava huomioon, että kaapeleiden läpi ei syötetty virtaa, mikä vaikuttaa osittaispurkausten syttymiseen kaapelin läpi kulkevan virran aiheuttaman lämmön puuttumisen vuoksi [9, s. 844]. Vanhennuskoe ei siis vastannut täysin kaapelin käyttöolosuhteita, vaikka koe suoritettiinkin säätölojen vaikutusten alaisena ulkokokekentällä. Lisäksi opinnäytetyön aikataulun johdosta vanhennuskoetta ei jatkettu aiemmin mainittua lopetusajankohtaa pidemmälle. Pätteiden vanhentumista olisi luonnollisesti ollut kiinnostavaa tutkia merkittävästi pidempään. Kuissa 5.23 ja 5.24 on esitettynä mittausten keskimääräiset, purkaustasot 12,5 kV ja 21,65 kV mittauksille. 21,65 kV mittauksessa mittausalueen yläraja oli 17000 pC ja siksi kahdesta mittauksesta ei saatu tarkkaa tulosta.



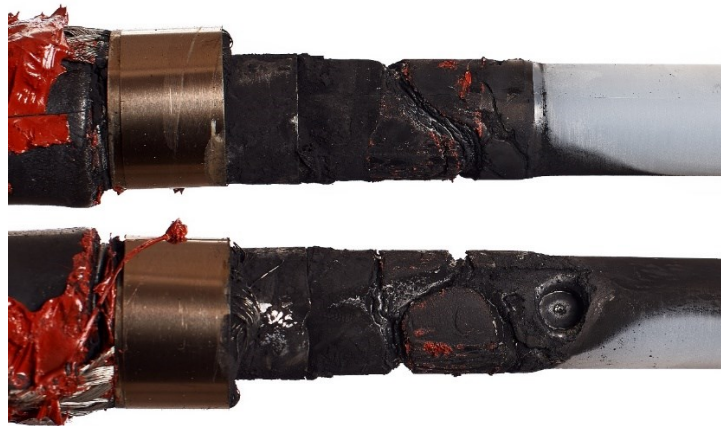
Kuva 5.23 Päätteiden C1, H3, H4 ja H5 12,5 kV mittauksen tulokset.



Kuva 5.24 Päätteiden C1, H3, H4, H5, H7, H9, H12 ja H14 21,65 kV mittauksen tulokset.

Tuloksista on nähtävissä, että joidenkin pitkäaikaisrasitettavana olleiden päätteiden purkausaktiivisuus on pienentynyt ensimmäisen viikon rasituksen jälkeen. Päätteet C1, H7, H9, H12 ja H14 eivät osoittaneet purkausaktiivisuutta 21,65 kV mittauksessa toisen

viikon mittauksen jälkeen. On tiedossa, että osittaispurkausontelot ja syntyvät sähköpuut laajenevat ja muotoutuvat räsituksen aikana, mikä voi muuttaa osittaispurkaustuloksia kokeen aikana. Missään päätteissä ei nähty selvää purkaustason kasvua, vaikka tasot olivat räsituskokeen aikana hyvin vaihtelevia. Tämä oli kuitenkin odotettua, koska vanhennusjakson lyhydestä johtuen purkausaktiiviteetti pikemminkin ehti vasta tasaantua jatkuvalla tasolle kuin saavuttaa varsinaisen vikaantumiskehityksen loppuvaiheen. Syttymis- ja sammumisjännitetasot kasvoivat hieman ja purkausaktiivisuus oli pääasiassa satunnaista. Huomionarvoista on, että pääte H3, josta puuttui kentänohjausmassa, vikaantui kolmannen koeviikon aikana. Kuvassa 5.25 on esitettyinä kuvat vikaantuneesta päätteestä.

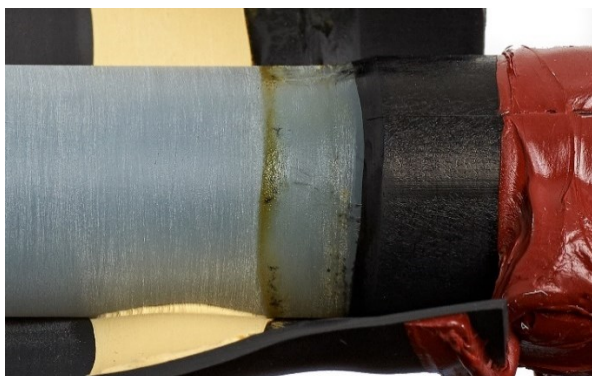


Kuva 5.25 Lämpökutistepääte H3 ja osittaispurkausten aiheuttama läpilyönti kahdesta suunnasta kuvattuna.

Kuvissa 5.26 ja 5.27 ovat päätteet H4 ja H5 auki leikattuina. Kuvista on nähtävissä, että kentänohjausmassa ei ole kentänohjaus- ja pintavirrankestävän letkun kutistamisesta aiheutuneen lämmön ansiosta laajentunut pääeristeeltä hohtosuojan päälle. Molemmissa päätteissä on nähtävissä osittaispurkausten vuoksi hiiltynyttä materiaalia ja päätteessä H5 selviä sähköpuiden alkuja.



Kuva 5.26 Pääte H4 auki leikattuna pitkäaikaisräsituskokeen jälkeen. Hohtosuojan ja pääeristeen rajalla on havaittavissa hiiltymiä.



Kuva 5.27 Pääte H5 auki leikattuna pitkäaikaisrasituskokeen jälkeen. Hohtosuojan ja pääeristeen rajan lähistöllä on havaittavissa hiiltymiä.

Yleisen tietämyksen ja mittaustulosten perusteella on selvää, että kentänohjaus tulisi asentaa mahdollisimman tarkasti ja ohjeiden mukaan. Pääte H3 oli ainoa, joka vikaantui, mutta pitkäaikaisrasituskokeeseen käytetty aika oli hyvin lyhyt. Vian luonteen vuoksi ainakaan pääte H3 ei olisi luultavasti kestänyt kauaa osana sähköverkkoa.

Vanhennuskokeen tulokset kuvaavat jossain määrin asentajan päätteisiin tekemien vikojen alkuvaiheen kehittymistä. Vaikka koekappaleita oli vain 8, melkein kaikista oli ainakin jossain määrin nähtävissä lievästi laskeva trendi vanhennuskokeen 6 viikon mittausten aikana, vaikka purkausaktiivisuus muuten oli melko vaihtelevaa ja pääte H3 vikaantui yllättäen. Kokemuseräisesti tiedetään, että purkausaktiivisuus voi tasoittua alun muutosten jälkeen ja osassa päätteistä se olikin nähtävissä selvästi. Pääteen sisäisessä eristysrakenteessa esiintyvät purkaukset hyvin todennäköisesti kuitenkin johtavat pidemmän ajan kuluessa sähköpuihin ja muihin eristettä vaurioittaviin ilmiöihin ja siten lopulta pääteen vikaantumiseen.

5.4.6 Mittausten luotettavuus ja toistettavuus

Osittaispurkauksiin liittyy lukuisia purkausaktiiviteettiä ja purkausten suuruuteen vaikuttavia ilmiöitä, joiden vuoksi osittaispurkausmittausten analysoiminen ei ole täysin suoraviivaista. Koekappaleen yli vaikuttava jännite vaikuttaa purkausten voimakkuuteen ja lukumäärään. Lisäksi purkauksiin vaikuttaa se, millaisia jännite- ja purkausrasituksia koekappale on kokenut aiemmin. Koekappaleen tulisi antaa levätä useita tunteja mittausten välillä, jotta mittaukset olisivat toisistaan riippumattomia. Eri jännitetasoilla tehtävät kokeet on kuitenkin tehty ajankäytöllisistä ja koekappaleiden lukumäärään liittyvistä syistä peräkkäin ja ovat siten vertailukelpoisia keskenään.

Eri tapauksissa tehdyissä mittauksissa havaittiin, että mittausten tulokset olivat suhteellisen hyvin toistettavia. Syttymisjännite on ollut kaikissa tapauksissa alin jännitetaso jolla purkauksia on mittauksen aikana syttynyt ensimmäisen kerran, vaikka

jännite on jouduttu joskus nostamaan 30 kV asti syttymisjännitettä määritettäessä ennen varsinaisia trendi- ja PRPDA-mittauksia. Tämän vuoksi voidaan melko hyvällä varmuudella arvioida, että purkaustasot ovat olleet varsinaisissa mittauksissa realistisia ja mittausten jännitteen järjestelmällisestä nostosta johtuen vastaavat melko hyvin jatkuvaan tilaan asettuneita purkaustasoja. Standardin IEC 60270 mukaan standardinmukaisesti kalibroitu ja tehty mittausta sisältää virhettä $\pm 10 \%$ tai $\pm 1 \text{ pC}$. Standardin mukaan pohjakohinan ja jänniterasitusten lisäksi mittausherkkyyteen vaikuttaa koekappaleen ja kytkentäkondensaattorin kapasitanssien suhde. Suurin herkkyyks saavutettaisiin, jos kytkentäkondensaattorin kapasitanssi olisi kertaluokkia suurempi, kuin koekappaleen, mutta standardin mukaan yleensä riittää, että kytkentäkondensaattorin kapasitanssi on noin 1 nF tai suurempi. Tässä työssä käytetyn kytkentäkondensaattorin kapasitanssi on 4 nF, eli vaatimus täyttyy.

Pohjakohinan vaikutus tämän työn mittauksiin on ollut hyvin pieni. Koekappaleet ovat matalakapasitanssisia ja pohjakohina laboratorio-olosuhteissa on saatu pääosin pysymään alle 0,30 pC. Suurimmillaankin pohjakohina on ollut vain 1,60 pC säähuoneessa tapahtuvissa mittauksissa.

Kaapelipäätteiden mittauksissa käytettiin suurimmillaan 30 kV jännitettä. Ennen mittauksia oletettiin, että näin suurilla jännitteillä saattaa syntyä pintapurkauksia tai koronapurkauksia kaapelipäätteiden tai kaapelikenkien pinnalle. Ulkoiset purkaukset otettiin huomioon tarkkailemalla koekappaletta ultraäänipeilillä suurimpia jännitteitä käytettäessä. Joissakin kappaleissa ulkoisia purkauksia syttyi jo alle 20 kV jännitteillä ja ne saatiin sammumaan asettamalla vapaana olevan kaapelikengän päälle metallinen pyöreä kuori ohjaamaan sähkökenttää. Hyvällä varmuudella voidaan sanoa, että mittaustuloksissa ei esiinny ulkoisten purkausten aiheuttamia vääristymiä.

6. YHTEENVETO

Sähköverkkoon asennettujen kaapelipäätteiden toimintavarmuus on tärkeä osa verkon luotettavuutta ja kaapelipäätevioista johtuvien käyttökeskeytysten sekä keskeytyskustannusten minimointia. Kaapelipäätteiden ja –jatkosten vikaantuminen voi aiheuttaa pitkän sähkökatkon ja toisaalta komponenttien vaihtaminen uusiin liian aikaisin toisi huomattavasti ylimääräisiä kustannuksia verkkoyhtiöille.

Osittaispurkausten mittaamisella on mahdollista havaita suurjännitelaitteiden ja eristysrakenteiden vika-alttiita kohtia. Pienetkin osittaispurkaukset kuluttavat muovieristeitä ja varsinkin kaapelien ja kaapelipäätteiden sisäiset eristysrakenteet tulisivat olla purkausvapaita. Vaikka osittaispurkauksia voidaan kunnonhallintamielessä mitata käytössä olevista kaapelipäätteistä ja muista verkon komponenteista, mittaustoiminta on kenttäolosuhteissa häiriöherkkää ja kallista.

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin joitakin Ensto Oy:n kylmä- ja lämpökutistepäätteisiin asennuksen aikana tehtyjä osittaispurkauksia aiheuttavia vikoja. Kaapelipäätteiden asentamisen ja laboratoriokokeiden perusteella on selvää, että asennusohjeiden noudattamisen lisäksi työ täytyy tehdä muutoinkin erityistä huolellisuutta noudattaen. Kaikki tarkoituksella päätteisiin tehdyt viat tuottivat osittaispurkauksia työssä käytetyillä mittausjännitetasoilla ja monet niistä jo käyttöjännitetasolla.

Kentänohjausmassan asennusvirheet aiheuttivat suurimmat purkaustasot, mutta toisaalta ne olivat myös kaikkein räikeimpiä asennusvirheitä. Niiden lisäksi hohtosuojan sorvauksen virheet: urautuminen ja hohtosuojan jäämä olivat ilmeisiä, helposti asennuksen aikana nähtävillä olevia asennusvirheitä. Pääeristeen huolimaton hionta ja sen seurauksena eristeen pinnalle joutunut puolijohtava pöly aiheutti, ehkä hieman yllättäen, myöskin osittaispurkauksia. Pölyn aiheuttamat ongelmat ovat tutkituista virheistä ehkä tekijälle hankalimpia mieltää todellisiksi riskitekijöiksi. Huolimattoman hionnan seurauksena pääeristeen pinnalle joutuneiden puolijohtavien hiukkasten aiheuttamia purkauksia syntyi, vaikka pääeriste puhdistettiin hionnan jälkeen ohjeiden mukaisesti kaapelipäätteen mukana tulevalla puhdistusliinalla.

Tiiveyskoe antoi tietoa kaapelipäätteiden tiiveydestä ja taivutuskoe päätteiden mekaanisesta kestosta asennettaessa niitä kylmissä olosuhteissa. On teoriassa mahdollista, että päätteiden sisälle pääsee vettä joissakin olosuhteissa ja sen seurauksena eristyksen läpi kulkeva vuotovirta voi kasvaa. Myös vesipuiden muodostuminen on mahdollista veden ja riittävän suuren sähkökentän läsnä ollessa.

Työn mittauksissa havaittiin, että päätteet olivat kuitenkin hyvin tiiviitä vaikka testi oli merkittävästi pidempi kuin standardissa. Ainoastaan yhdessä päätteessä havaittiin hieman alentunut eristysresistanssi. Taivutuskoe tehtiin kylmissä olosuhteissa ja sen tarkoituksena oli tutkia kaapelipäätteiden asentamisessa mahdollisesti syntyviä osittaispurkauksia muuten hyvin tehdyissä päätteissä. Taivuttaminen synnytti pieniä varsin epäjatkuvia, kymmenen picocoulombin suuruisia purkauksia, mutta suurta purkausaktiiviteettia ei mitattu. Asennus on silti syytä tehdä asennusohjeiden mukaisia taivutussäteitä noudattaen sekä lämmittämällä lämpökutistepäätteet uudelleen taivuttelun jälkeen, vaikka päätteet kestivät lähellä päätteen alinta asennuslämpötilaa tapahtuvaa taivuttelua hyvin.

Vanhennuskokeessa seurattiin osittaispurkausten kehittymistä ikääntymisen alkuvaiheessa 6 viikon ajan. Nähtävillä oli keskimäärin lievästi laskeva purkausaktiiviteettitrendi purkausten alkuvaiheen vaihtelun tasoituttua. On kuitenkin todennäköistä, että eriste jatkaa kulumista ja purkaustasot nousevat myöhemmin siten, että päätteet eivät kestä täyttä käyttöikänsä osana sähköverkkoa. Eräs lämpökutistepääte, jossa ei ollut kentänohjausmassaa myös vikaantui vanhennuskokeen kolmannen viikon aikana.

Osittaispurkausaktiivisuus oli joissakin koekappaleissa tasaista ja toisissa taas hyvinkin vaihtelevaa. Purkausilmiön kompleksisen luonteen ja kuitenkin melko samankaltaisten vikatyypin vuoksi datasta ja PRPDA-kuvista on vaikea erottaa eri vikatyypin havaitsemiseksi tarvittavia, riittävästi toisistaan eroavia ominaispiirteitä. Jotakin yhdenmukaisuutta oli kuitenkin nähtävissä samantyyppisten vikojen purkauksuvioissa vaikka päätteissä olleista useita purkausonteloista tulevat purkaukset kerrostuvatkin samaan kuvioon ja hankaloittavat tulosten silmämääräistä analysointia.

Tutkituista vioista vakavimpia olivat kentänohjausmassan viat. Niistä melkein kaikissa esiintyi muihin vikoihin verrattuna suuria osittaispurkauksia jo huomattavasti käyttöjännitettä matalammilla jännitteillä. Vähiten purkausaktiivisuutta esiintyi kylmäkutistepäätteissä, joiden pääeristeen pinnalle oli sorvauksessa jätetty pala hohtosuoja. Lisäksi mekaaninen taivuttelu sekä tiiveyskoe aiheuttivat ainostaan matalaa purkausaktiiviteettia ja päätteet kestivät rasitukset hyvin. Yllättävää oli, että pääeristeen pinnalle hionnan seurauksena joutunut puolijohtava pöly aiheutti osittaispurkausaktiiviteettia.

Kaapeleihin asennettavien lämpö- ja kylmäkutistepäätteiden asentaminen on monivaiheinen prosessi, jonka aikana on mahdollista tehdä varsin helposti useita erilaisia asennusvirheitä. Kaapelipäätteiden asennusohjeet sisältävät monta kohtaa ja asentamisessa käytetään useita erikoistyökaluja. Lisäksi kaapelipäätteitä on saatavilla usean eri valmistajan toimesta useita erilaisia, mikä osaltaan voi tuoda haasteita asentajalle, jos asentaja on aiemmin tottunut työskentelemään muunlaisten päätteiden

parissa. Koska kaapelipäätteitä asennetaan kentällä hyvin vaihtelevissa olosuhteissa, ja koska erilaisten päätteiden asennukset saattavat poiketa toisistaan, asentajan työn laatu ja ammattitaito käytännössä määräävät päätteen vikavapauden ja toimintavarmuuden. Tästä syystä kaapelipäätteiden asennuttajien tulisi huolehtia, että asentajilla on tarvittavat työkalut, olosuhteet, tietotaito ja koulutus tarvittavien päätetyyppien asentamista varten. Näin vältetään kaapelipäätteiden huolimattoman asentamisen seurauksena syntyviltä vikaantumisilta, käyttökeskeytyksiltä ja keskeytyskustannuksilta.

LÄHTEET

- [1] Hirvonen, M.: Tutkintotyö: Effect of assembly error on partial discharge levels in medium voltage terminations. Helsingin ammattikorkeakoulu, 2008.
- [2] Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K., Palva, V.: Suurjännitetekniikka. Otatieto, 3. painos. 2003.
- [3] <http://www.clippercontrols.com/pages/Dielectric-Constant-Values.html>. Viitattu: 21.9.2018.
- [4] Kuusisto, O.: Tutkintotyö: The effects of installation-based defects in medium voltage cable joints. Helsinki Metropolia university of applied sciences. 2016.
- [5] Nurmi, J.: Tutkintotyö: PD-mittaukset osana kunnonvalvontaa. Tampereen ammattikorkeakoulu. 2005.
- [6] Väkeväinen, K.: Opinnäytetyö: Surface discharge phenomena in medium voltage terminations. 2015.
- [7] Tanaka, T.: Aging of polymeric and composite insulating materials. IEEE 2002.
- [8] Fothergill, J.C., Dodd, S.J., Dissado, L.A.: The measurement of very low conductivity and dielectric loss in XLPE cables: a possible method to detect degradation due to thermal aging. IEEE 2011.
- [9] Hui, B., Liu, C., Tian, Y., Fu, M., XU, Y., Zhang, Y.: The relationship between partial discharge behavior and the degradation of 10 kV XLPE cable joints. International conference on condition monitoring and diagnosis, 2016.
- [10] Lantto, T.: Opinnäytetyö: Keskijännitekaapeleiden osittaispurkauksien mittaaminen VLF-tekniikalla. Lapin ammattikorkeakoulu, 2015.
- [11] Habas, J-P., Arrouy, J-M. Perrot, F.: Effects of electric partial discharges on the rheological and chemical properties of polymers used in HV composite insulators after railway service. IEEE 2009.
- [12] Tokunaga, S., Tsurusaki, T., Arief, Y.Z., Ohtsuka, S., Mizuno, T., Hikita, M.: Partial discharge characteristics till breakdown for XLPE cable joint with an artificial defect. Proceedings of the 7th international conference on properties and applications of dielectric materials, 2003.
- [13] Palit, S., Varghese, D., Guo, H., Krishnan, S., Alam, M.A.: The role of dielectric heating and effects of ambient humidity in the electrical breakdown of polymer dielectrics. IEEE 2015.
- [14] Sun, Y., Boggs, S., Ramprasad, R.: The effect of dipole scattering on intrinsic breakdown strength of polymers. IEEE 2015.

- [15] Neff, H.F., Lima, A.M.N., Melcher, E.U.K., Moreira, C.S., Barreto Neto, A.G.S., Precker, J.W.: An electro-thermal approach to dielectric breakdown in solids: application to crystalline polymer insulators. IEEE 2010.
- [16] Bhattacharyy, S., Chakraborty, A., Saha, B., Chatterjee, S.: Electric stress analysis of a medium voltage cable termination subjected to standard and non-standard lightning impulse voltages. ICICPI, 2016.
- [17] Abdelmalik, A.: Influence of sinusoidal and square voltages on partial discharge inception in geometries with point-like termination. IET Journals, June 2017.
- [18] El-Sayed, M. El-Refaije, Abd Elrahman, M.K., Zidane, O.: Effect of void position on partial discharge properties in different insulating materials. MEPCON, 2017.
- [19] Paoletti, G., Golubev, A., Luentokalvot: Partial discharge theory and applications to electrical equipment.
- [20] Liao, R., Yang, L., Li, J., Grzybowski, S.: Aging condition assessment of transformer oil-paper insulation model based on partial discharge analysis. IEEE 2011.
- [21] Ahmed, Z., Hussain, G.A., Lehtonen, M., Varacka, L., Kudelcik, J.: Analysis of partial discharge signals in medium voltage XLPE cables. IEEE 2016.
- [22] Pakonen, P.: Sähköpurkaustyyppin tunnistaminen radiohäiriömittauksilla: diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 1992.
- [23] Lahti, K.: Luentokalvot: Suurjännitelaitteiden osittaispurkausmittaukset, 2014.
- [24] Elovaara, J., Haarla, L.: Sähköverkot II. Otatieto, 1. painos. 2011.
- [25] Europacable: Cable accessories in underground medium voltage distribution networks. 2016.
- [26] Timpe, N.B., Heyer S.V. Laboratory and field partial discharge studies by a utility.
- [27] Sähkönumerot: <https://www.sahkonumerot.fi/0622438/img/large/color.jpg>. Viitattu: 25.9.2018.
- [28] Luentokalvot: suurjännitetekniikka, Tampereen teknillinen yliopisto, 2014.
- [29] Metwally, I.A., Al-Badi, A., Al-Hinai, A., Al-Mayasi, M., Al-Harhi, A., Al-Hashmi, K., Al-Zaabi, I.: Reduction of electric-field intensification and hot-spot formation inside cable terminations. IEEE 2014.
- [30] Ensto Oy: Luentokalvot: Stress control techniques in MV cable accessories, field strength simulations. 2017.
- [31] Ensto Oy: Asennusohje: Lämpökutistepäätteet AHXAMK-W kaapeleille, 2011.
- [32] Ensto Oy: Asennusohje: Kylmäkutistepäätteet AHXAMK-W kaapeleille, 2018.
- [33] van der Wielen, P.C.J.M., Steennis, F.: Experiences with continuous condition monitoring of in-service MV cable connections. IEEE 2009.

- [34] Zhou, Y., Zhou, Z., Guo, S., Niu, Z., Huang, M., Li, S.: Comparison of air corona PD characteristics under low and power frequency voltage by impulse-current method. IEEE, 2017.